



**Ana Cristina Barreira Rodrigues**

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

## **Simulação Hidrológica de Cheias na Bacia do rio Cavaco em Angola**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão da Água

Orientador: Professor Doutor António Carmona Rodrigues,  
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Pedro Santos Coelho

Arguente: Professor Doutor Paulo Alexandre Diogo

Vogal: Professor Doutor António Carmona Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro de 2014**



## **Simulação Hidrológica de Cheias na Bacia do rio Cavaco em Angola**

Copyright © Ana Cristina Barreira Rodrigues, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

O primeiro agradecimento vai para o Professor Doutor António Carmona Rodrigues pela sua orientação, compreensão e apoio durante todo o mestrado.

Quero agradecer aos engenheiros Luís Quintino, da empresa Águas de Angola, e Manuel Quintino, Diretor de Recursos Hídricos da DNA, pelo incentivo na escolha do tema.

Agradeço a cedência de informação aos serviços bibliotecários e de arquivo do IPMA, Arquivo Histórico Ultramarino (IICT), Estação Agronómica Nacional, SNIRH (APA) e Sociedade de Geografia de Lisboa. Sinto-me muito grata ainda pela existência de vários projetos internacionais que disponibilizam informação on-line gratuita indispensável ao desenvolvimento de projetos deste carácter em zonas com escassez de dados.

Não poderia deixar de agradecer o contributo especial para o progresso deste trabalho de mestrado à Lucélia, Paulo, João Gomes, Vasco, André, João Cândido e Tiago.

Agradeço à família que me apoiou durante o meu percurso académico. Aos meus queridos amigos, presentes faça sol ou ocorra precipitação, o meu maior agradecimento.

Por fim, agradeço ao meu pai, paizão, grande companheiro, melhor amigo e, sobretudo, a maior inspiração.



## Resumo

As cheias são um dos mais comuns riscos naturais para a humanidade. Existe a necessidade de identificar o perigo e o risco associado de forma a sustentar as decisões no âmbito das políticas de gestão às diferentes escalas.

A severidade das cheias repentinas na bacia hidrográfica do rio Cavaco, na província de Benguela, em Angola, tem sido frequentemente nefasta tanto a nível humano e material, como para as atividades socioeconómicas no território, especialmente no Vale do Cavaco e nas zonas ribeirinhas da cidade de Benguela. Desta forma, é necessária uma avaliação integrada do regime hidrológico do rio Cavaco e a modelação das condições físicas e meteorológicas.

Dada a inexistência de dados hidrométricos para trabalhar foram utilizados unicamente os dados pluviométricos históricos e a informação disponível sobre a bacia hidrográfica para caracterizar escoamento na bacia. Com recurso à extensão para o ArcGIS HEC-GeoHMS e do modelo matemático HEC-HMS construiu-se um modelo da bacia hidrográfica que permitiu a simulação de diferentes eventos de precipitação intensa, para diferentes condições da bacia hidrográfica. Por último, a introdução de reservatórios no modelo permitiu tirar conclusões quanto aos efeitos de uma possível retenção de água a montante.

A construção do modelo da bacia permitiu a caracterização empírica do nível de cheias para episódios de precipitação extrema com duração de 24 horas, tendo-se comparado posteriormente os resultados com a informação encontrada sobre cheias na bacia em estudo. No futuro, uma avaliação do risco de cheia irá permitir a adequação de medidas de prevenção e mitigação dos danos.

**Palavras-chave:** rio Cavaco, Benguela, cheias, modelação hidrológica, HEC-HMS





## ***Abstract***

Floods are one of the most common natural hazards to humanity. There is a constant need of identifying risk in order to support public management decisions.

The effects of flash floods on the Cavaco river in Benguela, include loss or injury of human lives and damage to buildings and other structures, including bridges. Socio-economic activities in the territory, especially in Vale do Cavaco and adjacent zones of the city of Benguela, are compromised due to flooding. In this regard it is necessary an integrated assessment of the components affecting the hydrological regime through modeling the physical and meteorological conditions.

Without hydrometric measurements, historical rainfall and basin characteristics were used to transform intense rainfall in runoff. Using the ArcGIS extension HEC-GeoHMS and the mathematical model HEC-HMS a watershed model was developed enabling the simulation of different events of intense rainfall for different conditions in the watershed. With the introduction of a reservoir in the model it was possible to draw conclusions about hypothetical upstream water retention.

Building the basin model enabled an empirical characterization of floods for episodes of extreme precipitation lasting 24 hours. Afterwards the model results were confronted with the information presented by other studies. This is the first step of risk reduction studies for the evaluation of appropriate prevention and mitigation solutions.

***Keywords:*** *Cavaco river, Benguela, floods, modelling, HEC-HMS*



# Índice Geral

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do documento .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. A problemática das cheias .....	5
2.1.1. Introdução.....	5
2.1.2. As cheias e as suas consequências .....	5
2.1.3. Mitigação e controlo de cheias .....	7
2.1.4. Estudo e modelação de cheias .....	11
2.2. A água em Angola.....	14
2.2.1. Generalidades .....	14
2.2.2. Enquadramento legal .....	16
2.2.3. O risco de cheias em Angola .....	19
3. METODOLOGIA .....	21
3.1. Nota introdutória .....	21
3.2. Recolha de dados.....	22
3.3. Tratamento de dados .....	24
3.3.1. Cálculo dos fatores que caracterizam a bacia hidrográfica .....	24
3.3.2. Análise estatística dos dados udométricos .....	28
3.3.3. Preparação do modelo da bacia em ArcGIS .....	30
3.4. Simulação hidrológica .....	31
4. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAVACO .....	37
4.1. Introdução geral.....	37
4.2. Caracterização climática .....	40
4.3. Ocupação e uso do solo.....	42
4.4. Caracterização morfológica, geológica e litológica .....	43
4.5. Principais utilizações da água na bacia .....	47
4.6. Eventos extremos na bacia .....	48
5. APLICAÇÃO DO MODELO À BACIA DO RIO CAVACO .....	53
5.1. Características gerais.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>

5.2.	Cenários de simulação .....	56
5.3.	Resultados.....	60
6.	CONCLUSÕES .....	67
6.1.	Contributos e limitações do estudo .....	67
6.2.	Trabalhos futuros.....	68
	Referências bibliográficas .....	71
	Anexo I – Curvas de possibilidade udométrica para cada estação .....	75
	Anexo II – Hietogramas e hidrogramas (sub-bacias).....	78

# Índice de Figuras

## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Figura 1 - Enumeração dos prejuízos e benefícios consequentes do fenómeno de cheias. ....	7
Figura 2 - Hidrograma de cheia com chamada de atenção para o caudal de ponta de cheia. ..	11
Figura 3 - Distribuição da precipitação média anual em Angola. Fonte: Cain (2014) .....	15
Figura 4 - Mapa de Escoamentos elaborado para todo o território de Angola no âmbito do PLANIRRIGA. Fonte: Honrado <i>et al.</i> (2011) .....	16
Figura 5 - Percentagem por tipo de desastre natural das pessoas afetadas de que houve comunicação. Adaptado de CRED (EM-DATA), 2008.....	19
Figura 6 - Fluxograma da metodologia de trabalho seguida .....	21

## Capítulo 3 - Metodologia

Figura 7 - Localização dos postos com influência na bacia hidrográfica do rio Cavaco e respetivos polígonos de Thiessen.....	23
Figura 8 - Fluxo de trabalho na análise do MDT .....	31

## Capítulo 4 - A bacia hidrográfica do rio Cavaco

Figura 9 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cavaco em Benguela, Angola e vertentes gerais do escoamento em Angola com a respetiva rede de drenagem .....	37
Figura 10 – Perfil longitudinal do curso de água principal do Rio Cavaco .....	39
Figura 11 - Temperaturas mínimas, temperaturas máximas e precipitação média ao longo do ano. (INAMET, 2014) .....	40
Figura 12 - Distribuição mensal da precipitação na bacia hidrográfica segundo o estudo da Sweco em 2005. (SWECO, 2005).....	41
Figura 13 - Precipitação média anual, calculada para o período em estudo.....	42
Figura 14 - Cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: Globcover (2009) ..	43
Figura 15 - Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Cavaco obtida por análise do MDT .....	44
Figura 16 - Tipo de relevo na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: SOTER-SAF (2012)....	45
Figura 17 – Classificação da textura dos solos dominantes na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: SOTER-SAF (2012) .....	46
Figura 18 - Litologia na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: SOTER-SAF (2012) .....	47
Figura 20 - A ponte rodoviária nova, construída na sequência da destruição da ponte antiga pelas cheias de 2002. Foto de RMCTeixeira, tirada a 30/09/2009. Fonte: Panoramio. ....	49
Figura 21 - Identificação dos bairros de Benguela com maior vulnerabilidade ao risco de inundações. Fonte de informação: Tonecas (2012). Fonte do mapa: GoogleMaps (2014) .....	50
Figura 22 - Perspetiva da ponte para a foz do rio Cavaco. Foto de José Pires, tirada a 21/08/2007. Fonte: Panoramio.....	50
Figura 23 - A mesma perspetiva três anos depois. Foto de Fernando Baptista, tirada a 21/02/2010. Fonte: Picasa .....	51

## Capítulo 5 - Aplicação do modelo de simulação hidrológica à bacia do rio Cavaco

Figura 24 - Sub-bacias utilizadas na simulação hidrológica (ArcGIS) .....	53
Figura 25 - Aspeto do modelo físico da bacia hidrográfica do rio Cavaco, no programa HEC-HMS.....	54

Figura 26 -Distribuição dos números de escoamento na bacia hidrográfica do rio Cavaco e valores médios por sub-bacia utilizados na modelação hidrológica .....	55
Figura 27 - Cenários de simulação .....	57
Figura 28 - Localização hipotética dos reservatórios testados e declive da bacia .....	58
Figura 29 - Curvas de armazenamento-descarga para os reservatórios escolhidos .....	59
Figura 30 - Hidrogramas relativos ao escoamento na secção de referência, resultante da simulação em regime natural para um tempo de chuvada intensa de 24 horas, simultânea em toda a bacia .....	61
Figura 31 - Escoamento resultante na junção imediatamente a montante da secção onde se localiza a estação de Guvriri .....	64
Figura 32 - Caraterísticas aproximadas da secção transversal do rio Cavaco na estação de Guvriri .....	64
Figura 33 – Curva de vazão resultante na secção da estação Guvriri .....	65

# Índice de Tabelas

## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Tabela 1 - Informação relativa às perdas humanas e económicas resultantes das cheias ocorridas entre 1980 e 2008. Fonte: CRED (EM-DATA), 2008 .....	6
---	---

## Capítulo 3 - Metodologia

Tabela 2 - Os diferentes tipos de sistemas de aviso de cheias em tempo real.....	9
Tabela 3 - Caracterização das estações udométricas utilizadas no estudo .....	22
Tabela 4 - Resumo das fontes dos dados utilizados na modelação.....	24
Tabela 5 - Curvas de possibilidade udométrica construídas por Azevedo para Luanda.....	30
Tabela 6 - Grupo hidrológico do solo. Fonte: Natural Resources Conservation Service, 2007 .	33

## Capítulo 4 - A bacia hidrográfica do rio Cavaco

Tabela 7 - Tabela resumo com as características da bacia hidrográfica.....	38
Tabela 8 - Análise estatística dos valores medidos de máximo diário anual para cada estação .....	41
Tabela 9 - Previsão da evolução populacional na bacia hidrográfica do rio Cavaco e do consumo de água. Fonte (SWEKO, 2005). .....	47

## Capítulo 5 - Aplicação do modelo de simulação hidrológica à bacia do rio Cavaco

Tabela 10 - Caraterização das sub-bacias .....	54
Tabela 11 - Número de escoamento e tempos de concentração para cada sub-bacia .....	56
Tabela 12 - Caraterísticas gerais dos reservatórios utilizados na simulação hidrológica .....	59
Tabela 13 - Aplicação da fórmula racional.....	60
Tabela 14 - Valores dos caudais de ponta de cheia na secção de referência, para as diferentes simulações, e percentagem de reduções com os reservatórios, face ao regime natural.....	62





## **Lista de siglas e abreviaturas**

CN - Curve Number (número de escoamento)

CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

DNA - Direção Nacional de Águas

DNRH - Direção Nacional de Recursos Hídricos

EUA - Estados Unidos da América

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

HEC - Hydrologic Engineering Center

HMS - Hydrologic Modeling System

IDF - Intensidade-Duração-Frequência

IICT - Instituto de Investigação Científica Tropical

INAMET - Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LCCS - Sistema para Classificação da Ocupação do Solo

MDT - Modelo Digital Terrestre

MINEA - Ministério da Energia e Águas

NAPA - Ação Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

PLANIRRIGA - Plano Nacional Diretor de Irrigação de Angola

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

USACE - US Army Corps of Engineers



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e enquadramento do tema

A presente dissertação, elaborada no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão da Água, tem como objetivo principal estudar o regime de cheias num local com pouca informação disponível, de forma a ser um contributo para um sistema de alerta de cheias repentinas.

A ocorrência de fenómenos extremos, tais como cheias e secas, acontece com frequência por todo o mundo. Angola em concreto tem sofrido inúmeras perdas humanas e materiais devido à intensificação da precipitação no tempo das chuvas e ao aumento da seca no período de estiagem (FAO, 2014). Sendo difícil prever as precipitações intensas com a antecipação necessária para evitar perdas materiais e humanas, é cada vez mais importante aprofundar o seu estudo e prever as suas consequências.

O caso de estudo, localizado em Angola, diz respeito à bacia hidrográfica do Rio Cavaco, situada na Província de Benguela, que abrange uma área de cerca de 4000 km<sup>2</sup>. A ocorrência de episódios de cheias repentinas na época da chuva tem vindo a preocupar as autoridades angolanas que se encontram empenhadas em implementar medidas preventivas que minimizem o risco associado às cheias. Para tal é necessário um planeamento integrado que deve ter por base a caracterização hidrológica e hidráulica do regime e a avaliação das condições naturais e antropológicas da bacia hidrográfica. É neste contexto que este trabalho pretende dar um contributo para o desenvolvimento e implementação de um projeto de gestão do risco a longo prazo, de forma a reduzir as consequências das cheias repentinas na zona em estudo.

Ao longo das últimas décadas os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm-se tornado cada vez mais uma ferramenta indispensável à modelação, uma vez que permitem a caracterização física da bacia hidrográfica, integrando diferentes fatores relevantes para a modelação hidrológica. A sua aplicação, incorporada no modelo matemático permite aferir a resposta da bacia hidrográfica em função de diferentes episódios de precipitação.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho resulta, em primeiro lugar, de um interesse pessoal pelo trabalho com casos de estudo em que a informação escasseia, uma vez que são, geralmente, zonas em desenvolvimento no que diz respeito ao conhecimento base para a gestão eficaz dos sistemas ambientais. Por outro lado, o interesse em trabalhar com os SIG, especialmente no estudo de riscos naturais, tendo em conta o potencial que esta ferramenta tem como suporte à decisão na gestão integrada dos sistemas. Por último, a situação particular deste território, inserido num país com elevado potencial a vários níveis, inclusive hidroelétrico

e de regadio, mas que esteve em guerra até 2002. A partilha do mesmo idioma representa uma mais-valia na partilha de conhecimento e informação, nomeadamente ao nível importante que é o risco de cheias, realidade existente tanto em Angola como em Portugal.

### 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal a caracterização das cheias repentinas na bacia hidrográfica do Rio Cavaco, através do estudo da relação precipitação-escoamento, utilizando SIG e o programa de modelação hidrológica HEC-HMS. Pretende-se utilizar este *software* para simulação de chuvadas intensas com duração de 24 horas para diferentes períodos de retorno – 5, 10 e 25 anos.

Pretende-se ainda, através do programa HEC-HMS analisar a alteração no escoamento na seção em estudo com a introdução de bacias de retenção a montante, recorrendo à ferramenta HEC-GeoRAS. Este exercício permite analisar em que circunstâncias poderíamos construir um reservatório de forma a reduzir a cheia associada a um período de retorno de 25 anos para o valor de pico de cheia associado ao período de retorno de 5 anos, utilizado frequentemente no dimensionamento dos sistemas de drenagem de águas pluviais.

Outro dos objetivos do trabalho é o de avaliar de que forma se pode tornar um modelo hidrológico como o HEC-HMS uma ferramenta útil na simulação do escoamento numa bacia hidrográfica com informação histórica limitada. A existência de hidrogramas de cheia é uma ferramenta indispensável em estudos deste caráter.

Por último, pretende-se demonstrar a eficiência da implementação da metodologia SIG enquanto suporte ao estudo do risco de cheia, com base nos dados disponíveis, para que possa vir a ser aplicada no futuro utilizando dados com maior qualidade e quantidade daqueles que estão disponíveis para a realização do presente trabalho.

### 1.3. Organização do documento

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. Neste capítulo introdutório apresenta-se a pertinência do trabalho, incluindo considerações iniciais, o objetivo do trabalho e a organização do documento.

O capítulo 2 diz respeito à revisão bibliográfica, onde são revistas as bases teóricas e contextuais do estudo. Aborda a problemática das cheias repentinas, com uma revisão das soluções de mitigação. Analisa-se e ainda a gestão da água em Angola e a solução de modelação em hidrologia.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia utilizada, desde a recolha de dados, o trabalho desenvolvido em ambiente de SIG, e no modelo hidrológico.

Por sua vez, no capítulo 4 é apresentado o caso de estudo e suas condicionantes. São revistas as vulnerabilidades locais bem como as potenciais consequências de inundações.

O capítulo 5 compreende a definição dos cenários da simulação hidrológica e os resultados alcançados, com discussão dos mesmos. São apresentados e comparados os hidrogramas de cheia e os caudais de ponta obtidos para área de estudo, resultado do modelo criado da bacia hidrográfica em estudo.

As conclusões são sintetizadas no capítulo 6, juntamente com as limitações encontradas ao longo do trabalho. São ainda sugeridos alguns estudos passíveis de dar continuidade à análise efetuada.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A problemática das cheias

#### 2.1.1. Introdução

O estudo dos variados aspetos relacionados com o fenómeno de cheias tem vindo a ser desenvolvido e aprofundado constantemente ao longo do tempo. A sua revisão bibliográfica completa é, desta forma, um desafio que se encontra para além do âmbito deste trabalho de mestrado. Assim sendo, neste subcapítulo são abordadas as consequências das cheias e o desenvolvimento do seu estudo, referenciando contributos em termos de modelação e alguns dos aspetos mais relevantes na sua mitigação.

#### 2.1.2. As cheias e as suas consequências

Segundo Lencastre e Franco (2003), as cheias são, tradicionalmente, fenómenos naturais que ocorrem sempre que a precipitação dá origem à ocorrência de escoamento superficial direto, que pode ser representado por um hidrograma de cheia.

No entanto, o conceito de cheia não tem uma definição única, tendo vindo a ser utilizado em diversas situações distintas. Portela (2005) define cheias como *“intumescências graduais e progressivas da superfície livre de cursos de água a que correspondem alturas máximas do escoamento que se propagam para jusante”*. Consequentemente, a água galga as margens existentes, alagando as zonas contíguas ao curso de água.

É possível distinguir-se os diferentes tipos de cheia: cheias costeiras, cheias ao longo dos rios, cheias repentinas (em inglês *flash floods*) e cheias urbanas.

As cheias podem ter na sua origem causas naturais, como por exemplo na definição de Lencastre e Franco (2003), ou origem artificial, de que é exemplo a rutura de uma barragem. As que representam maior perigo são as cheias repentinas, devido ao curto intervalo de tempo entre o início da chuvada e a propagação da cheia. Na literatura são consideradas vulneráveis a este tipo de cheia as bacias hidrográficas a que correspondem tempos de concentração até 6 horas ou até 12 horas, dependendo dos autores (Portela, 2005).

As diferentes características de uma bacia hidrográfica condicionam o tipo de cheia e a sua intensidade, sendo que a dimensão da bacia condiciona, logo à partida, o padrão de cheia. Segundo Pilgrim & Cordery (1992) as pequenas bacias têm uma área até 25 km<sup>2</sup> sendo que

são consideradas grandes bacias as que superam os 500 km<sup>2</sup>. Por norma, as pequenas bacias têm maior tendência para a ocorrência de cheias repentinas.

Sendo as cheias fenómenos dinâmicos e não estacionários dependem das restantes variáveis na bacia hidrográfica e da sua interação: morfologia da região, precipitação, tipo de solo, ocupação e uso do solo, gestão humana dos sistemas. Também os rios e as planícies aluviais se transformam com a passagem do tempo através de fenómenos de erosão natural e alterações no transporte de sedimentos (He *et al.*, 2013), possibilitado uma alteração do regime de cheias a longo prazo.

Já o conceito de inundação é mais abrangente, sendo definido pela Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações como “a cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água.” Esta definição inclui as cheias acima referidas e as inundações devido ao aumento do nível do mar na zona costeira.

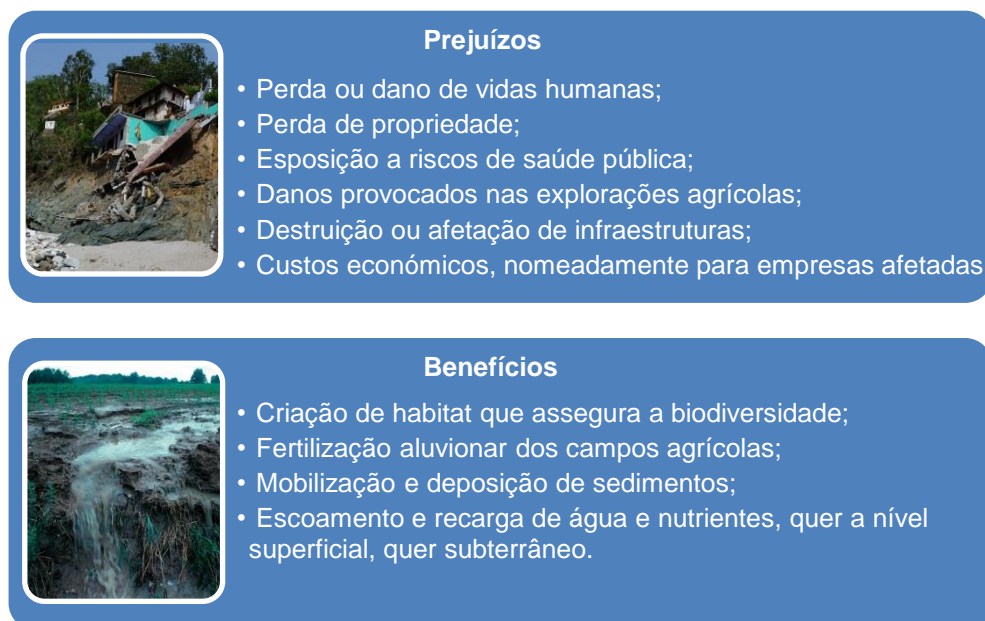
Segundo a Organização Mundial Meteorológica (WHO do inglês *World Health Organization*), só na última década do século XX foram afetadas por cheias ou inundações 1,5 mil milhões de pessoas. O impacto das cheias a nível global é colossal. A Tabela 1 resume a informação disponível na base de dados internacionais do Centro de Investigação sobre a Epidemiologia dos Desastres (CRED).

**Tabela 1 - Informação relativa às perdas humanas e económicas resultantes das cheias ocorridas entre 1980 e 2008.** Fonte: CRED (EM-DATA), 2008

Número de eventos	2.887
Número de mortes	195.843
<i>Média anual</i>	6.753
Número de pessoas afetadas	9.481.489
<i>Média anual</i>	96.878.672
Prejuízos económicos (US\$ x 1000)	397.333.885
<i>Média anual (US\$ x 1000)</i>	13.701.168

As cheias têm, do ponto de vista antrópico, vantagens e desvantagens, listadas na Tabela 1 que variam conforme o risco de cheia e a vulnerabilidade dos terrenos marginais. O número de mortes resultante de uma cheia numa comunidade está diretamente relacionado com o tipo de cheia, a eficiência do sistema de pré-aviso, a capacidade de evacuação e abrigo e com a perda de habitações. A nível individual está dependente essencialmente do comportamento do indivíduo, condicionado pela informação de que dispõe e características intrínsecas como a idade e o género (Jonkman & Vrijling, 2008).





**Figura 1 - Enumeração dos prejuízos e benefícios consequentes do fenómeno de cheias.**  
Adaptado de He *et al.* (2013)

O desenvolvimento económico e social, associado ao crescimento populacional, conduz a um aumento da urbanização, alterando o uso dos solos e a vulnerabilidade das regiões a fenómenos de cheias. Também as próprias alterações antrópicas no regime natural de cheias resultam em consequências positivas, normalmente sentidas a curto-prazo através do controlo a montante, e negativas, a médio-longo prazo, devido à alteração dos sistemas naturais. A avaliação local do regime de cheias permite prever os episódios, possibilitando assim, a prevenção e minimização das consequências.

### **2.1.3. Mitigação e controlo de cheias**

O Homem tem vindo ao longo da evolução civilizacional a desenvolver variadas técnicas para se proteger das cheias. São utilizadas tradicionalmente em engenharia obras de defesa como bacias de retenção para amortização da onda de cheia e estudos que possibilitam a delimitação das áreas de risco e dimensionamento de sistemas de aviso de cheias (Lencastre & Franco, 2003).

De forma a reduzir prejuízos humanos e materiais consequentes das cheias é necessária a existência de um planeamento integrado que diminua o risco e a vulnerabilidade às cheias. A vulnerabilidade a cheias é definida no estudo de He *et al.* (2013) como a capacidade para resistir ou recuperar do impacto negativo do fenómeno a médio e longo prazo. É função da suscetibilidade local, da exposição e do nível de resiliência.

Têm sido utilizados, no geral, dois métodos distintos para avaliar o perigo, o risco e a vulnerabilidade ao fenómeno de cheias (Balica *et al*, 2013). O primeiro baseia-se na modelação física, utilizando eventos específicos e modelos que caracterizam os possíveis danos económico-sociais. O segundo diz respeito a uma abordagem paramétrica, isto é, a utilização de dados disponíveis para uma caracterização geral do sistema e classificação segundo um Índice de Vulnerabilidade a Cheias (FVI do inglês *Flood Vulnerability Index*). O FVI não avalia diretamente o risco de cheia, mas por outro lado abrange outros aspetos a nível socio-ambiental, económico, através da análise da resiliência de infraestruturas e populações. Uma vez que possibilita uma avaliação mais abrangente, embora menos rigorosa, é útil na avaliação de vulnerabilidade ao risco de cheias a uma escala maior. A abordagem determinística é indicada para avaliações locais e pode surgir na sequência de uma recomendação resultante de uma análise FVI prévia.

Para tal é necessário o estudo prévio e previsão o mais exata e atualizada possível. Contudo, no caso de cheias repentinas, associadas geralmente a bacias hidrográficas de menor dimensão e com um tempo de concentração reduzido, a previsão é altamente improvável.

A Comissão das Comunidades Europeias através da Diretiva 2007/60/CE estabelece que para cada unidade hidrográfica deve ser feita uma avaliação preliminar dos riscos de inundações que deve incluir: informação geográfica das bacias a uma escala apropriada, inventário dos eventos históricos, descrição dos eventos mais relevantes, avaliação das potenciais consequências prejudiciais, análise das condicionantes das alterações climáticas. No caso das regiões hidrográficas internacionais deve ser garantida a cooperação entre países. Para cada região hidrográfica devem ser elaboradas cartas de zonas inundáveis, para diferentes probabilidades, e cartas de risco de inundações. Estas últimas devem indicar a afetação potencial por número de habitantes, tipo de atividades e instalações que representam risco ambiental. O esforço, segundo a mesma Diretiva, deve ser concentrado na redução dos riscos identificados através de um plano de gestão de riscos de inundações que contemple custos e benefícios, amplitude de inundações, direções de escoamento das águas e zonas com potencial para amortecer as cheias, objetivos ambientais, navegação e infraestruturas. Os planos devem ser elaborados com a participação ou consulta de todos os *stakeholders* e disponibilizados para informação ao público. Os planos requerem revisão de seis em seis anos de forma a acompanhar modificações nos sistemas abrangidos e possíveis alterações devidas ao impacto das alterações climáticas (Diretiva 2007/60/CE, 2007).

Os planos de gestão de cheia devem ser elaborados com base nas experiências precedentes, estudando o comportamento do sistema e interpretando da melhor forma a resposta do mesmo às medidas implementadas no passado. Esta última análise é de especial importância uma vez que permite conhecer de uma forma mais profunda o funcionamento do sistema e completar continuamente ao longo do tempo a informação sobre o mesmo. Assim, a política de gestão, idealmente, será um reflexo do conhecimento adquirido, evoluindo com a integração da

informação cada vez mais completa do sistema em si, e nas relações com outros sistemas envolventes (Newell & Wasson, 2001).

A gestão das cheias, para além de avaliar os danos na ocorrência do evento, deve analisar continuamente o impacto e adequação das políticas e medidas implementadas, de uma perspetiva holística, que abranja um vasto período de tempo. Desta forma, é possível reduzir ao máximo a probabilidade de resultados inesperados e, assim, o risco associado às cheias.

Desta forma, o ciclo de gestão de cheias deve constituído por: prevenção - minimização dos prejuízos causados pelas inundações, evitando a construção de habitações e indústrias em áreas com risco de cheia, no presente ou no futuro, adotando medidas de antecipação aos riscos de cheia e promovendo práticas de uso do solo e práticas agrícolas e florestais adequadas; proteção - adequação de medidas, estruturais ou não estruturais, inseridas num plano de gestão de cheia, cujo objetivo é o de reduzir a probabilidade de ocorrência de cheias ou o impacto das mesmas em determinadas zonas, por exemplo através da construção de bacias de retenção ou implementação de um sistema de alerta; preparação - informação da população sobre os riscos de cheias, as suas consequências, as soluções disponíveis e sobre o modo de agir quando em caso de ocorrência local.

Os planos de emergência que incluam um sistema de previsão e alerta em tempo real têm necessariamente que ter por base um sistema de monitorização em pleno funcionamento. Têm como objetivo, mediante previsão de determinada altura de água (altura crítica), alertar a população e as autoridades para o risco eminente. A Tabela 2 resume os diferentes tipos de sistemas consoante a informação em que se baseiam (Hénonin *et al.*, 2010).

**Tabela 2 - Os diferentes tipos de sistemas de aviso de cheias em tempo real.**

<b><i>Tipo de sistema</i></b>	<b><i>Base do sistema</i></b>	<b><i>Desafios que apresenta</i></b>
<b>A</b> <i>“Empírico”</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· registos históricos de precipitação</li> <li>· cenários empíricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· a atualização não é contínua</li> <li>· possível perda de conhecimento e <i>know-how</i></li> </ul>
<b>B</b> <i>“Baseado em cenários”</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· registos históricos de precipitação</li> <li>· cenários pré-definidos com base num estudo prévio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· risco de desatualização dos cenários mediante alterações na rede hidráulica ou alterações climáticas</li> </ul>
<b>C</b> <i>“Modelação em tempo real”</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· precipitação prevista para entrada num sistema de modelação <i>online</i> (componente hidrológica interligada à hidráulica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· risco de desatualização (como em B)</li> <li>· idealmente, a calibração deverá ser atualizada continuamente</li> </ul>

<p><b>D</b> "Controlo automático de resposta"</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· acrescenta ao tipo de sistema C o controlo automático e remoto dos dispositivos locais da rede que são controláveis, conforme as previsões</li> <li>· sensores remotos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· os mesmos que em C</li> <li>· dimensionamento e instalação dos procedimentos automáticos de forma correta de forma a garantir a eficiência e segurança a jusante</li> </ul>
---	--	--

Um exemplo para o tipo B é o sistema implementado em Hvidovre, Dinamarca, desde 2008. As imagens do radar local para previsão meteorológica são processadas com base na comparação com os dados históricos para calcular a precipitação acumulada em cada sub-bacia. Caso se preveja que algum dos níveis críticos pré-definidos seja atingido o aviso é comunicado às populações pelo "Sistema de Suporte à Decisão", por mensagem de telemóvel, e-mail ou através do site que atualiza continuamente a informação (Jensen *et al.*, 2008).

Já o sistema de aviso em tempo real do tipo C é utilizado em Banguecoque, Tailândia, desde 2002. Apenas a 2 metros acima do nível do mar e, por natureza, uma zona propícia a cheias, a cidade de Banguecoque, com uma alta densidade populacional, está exposta a um risco de inundações extremamente elevado (Hénonin *et al.*, 2010). Em Barcelona, onde é aplicado o mesmo tipo de sistema, conclui-se que os diferentes tipos de precipitação podem condicionar os resultados do modelo, uma vez que as precipitações convectivas são de previsão difícil (Mark *et al.*, 2014). O mesmo trabalho de análise, elaborado no âmbito do projeto europeu CORFU (*Collaborative Project on Flood Resilience in Urban Areas*), reforça a importância da agregação diligente de dados de precipitação prevista e medida de forma a garantir a robustez do sistema.

A robustez de um sistema pode ser definida como a capacidade de um sistema para permanecer em funcionamento em circunstâncias anormais devido a perturbações, sendo estas variáveis e incertas. É possível aferir a robustez de um sistema através da análise da resposta e da recuperação do mesmo quando exposto a diferentes magnitudes de perturbações (Mens *et al.*, 2011).

No que diz respeito às medidas de mitigação do risco de cheia, atualmente existem e estão a ser desenvolvidos modernos conceitos integrados que permitem uma solução mais viável a longo prazo do que as oferecidas pela engenharia clássica, na medida em que têm a vantagem de evitar ao máximo efeitos colaterais. Por exemplo, em vez de controlar o regime natural a montante das zonas de risco, propõem a adaptação das estruturas locais às cheias através, por exemplo, da construção hidrofílica. Esta adapta a construção dos edifícios ao tipo de terreno e aos níveis de cheia prováveis de forma a torná-los resistentes em vez de vulneráveis às cheias. Como tal, trabalhando com a natureza, e não contra ela, é possível criar um sistema resiliente e gerir de forma sustentável o fenómeno das cheias (He *et al.*, 2013).

Esta abordagem de “engenharia verde”, como é conhecida, implica a gestão integrada da bacia hidrográfica, isto é, o envolvimento de todos os *stakeholders*, alinhando no mesmo sentido as políticas de suporte, o quadro legislativo, os sistemas de incentivos, e promovendo a participação e informação pública (Ziegler *et al.*, 2012).

A informação e educação da população em relação ao fenómeno das cheias e a formação de profissionais qualificados é outra das medidas de prevenção que se tem demonstrado eficaz a nível da consciência social do problema.

#### 2.1.4. Estudo e modelação de cheias

O estudo de frequência de cheias, genericamente, relaciona o escoamento máximo da bacia hidrográfica com a probabilidade de ocorrência ou excedência, testando eventos de precipitação para diferentes períodos de retorno.

O conhecimento dos caudais de ponta de cheia de determinada linha de água é essencial no desenvolvimento de obras hidráulicas locais. Por sua vez, a obtenção de hidrogramas de cheia permite, por exemplo, dimensionar reservatórios para amortecimento de cheias (Portela, 2005). No gráfico da Figura 2 apresenta-se um hidrograma tipo registado após um episódio de precipitação ocorrido em determinada bacia hidrográfica.



**Figura 2 - Hidrograma de cheia com chamada de atenção para o caudal de ponta de cheia.**  
Adaptado de Lencastre e Franco (2003)

No hidrograma é possível identificar as seguintes quatro fases distintas (Lencastre & Franco, 2003):

1. a curva de crescimento, que corresponde ao aumento do caudal devido ao aumento do escoamento após a chuvada;
2. a ponta do hidrograma, que corresponde ao valor máximo de escoamento direto, ou seja, o caudal de ponta de cheia;
3. a curva de decrescimento, em que o escoamento direto diminui progressivamente até terminar;
4. a curva de esgotamento, que corresponde ao decréscimo do escoamento base, findo o escoamento superficial.

Com o objetivo de descrever e compreender o comportamento das diferentes componentes do ciclo hidrológico, a sua relação e as implicações hidráulicas têm vindo a ser desenvolvidos variados modelos com aproximações matemáticas (Leavesley *et al.*, 2006). A maior parte destes modelos são conceptuais, tendo por base um conjunto de parâmetros empíricos que necessitam de calibração através de medições no campo (Hénonin *et al.*, 2010).

Na utilização de qualquer uma das metodologias de modelação é importante a calibração do modelo de forma a otimizar o seu desempenho. Esta é feita através da especificação dos valores associados aos parâmetros do modelo de modo a estabelecer um critério de validação entre os resultados do modelo e os valores observados para as mesmas condições iniciais e de fronteira (Hipólito & Vaz, 2011).

O Deltares, instituto holandês autónomo de investigação na área da água, subsolo e infraestruturas, através da “Deltares systems”, marca que disponibiliza o *software* que o instituto desenvolve, disponibiliza, no campo da gestão da água, o modelo integrado SOBEK (Deltares, 2010). Este inclui as componentes necessárias para analisar rios, sistemas de irrigação e de drenagem. Permite, mais precisamente, a previsão de cheias, a otimização dos sistemas de drenagem, o dimensionamento e controlo de sistemas de irrigação, o controlo de redes de drenagem de águas residuais, o estudo da morfologia de rios e a análise da qualidade de água superficial e subterrânea. A computação numérica por detrás do motor de simulação permite a representação de processos físicos através de um sistema unidimensional (1D) ou através de *grids* bidimensionais (2D). Este programa é desenvolvido em cooperação com diversos institutos públicos holandeses, centros de investigação, universidades e consultores privados.

Por sua vez, a solução MIKE *by DHI* tem vindo a ser desenvolvida há mais de 40 anos pelo DHI (de *Dansk Hydraulisk Institut*, em português Instituto Dinamarquês de Hidráulica), organização que atua no domínio das questões relacionadas com a gestão da água a nível mundial (DHI, 2014). Em termos de gestão de recursos hídricos possibilita integrar as seguintes componentes: transporte de sedimentos, ecologia, rios e reservatórios, cheias, alterações climáticas, qualidade, gestão e distribuição da água, água superficial e subterrânea, fluxos em meios porosos. Este produto divide-se em cinco modelos: MIKE 11 para o estudo de

rios, MIKE FLOOD para análise de cheias, MIKE SHE para a caracterização hidrológica integrada das bacias, MIKE HYDRO Basin para o planejamento de recursos hídricos e o MIKE 21C para aplicações que envolvam morfologia e sedimentação dos rios. Para este trabalho, poderia ter sido interessante trabalhar com os modelos MIKE 11, MIKE FLOOD e ainda com o MIKE 21C que possibilita a delimitação de zonas inundáveis.

O HEC (*Hydrologic Engineering Center*) da USACE (*US Army Corps of Engineers*) tem vindo a desenvolver desde 1964 um conjunto de modelos que permitem a gestão de dados sobre as circunstâncias ambientais que condicionam o controlo dos recursos hídricos, instrumentos úteis no apoio ao planejamento. Uma dessas ferramentas é o modelo HEC-1 e o seu sucessor HEC-HMS, que têm por base a utilização de dados meteorológicos para caracterizar e prever a resposta da bacia hidrográfica à precipitação. O resultado é o escoamento superficial na bacia, incluindo as afluições aos reservatórios (Ford *et al.*, 2008). O modelo da bacia é construído através da separação do ciclo hidrológico em partes gerenciáveis e da definição das condições de fronteira da bacia hidrográfica em estudo. Qualquer subsistema, em seguida, pode ser representado por um dos vários modelos matemáticos disponibilizados no HEC-HMS. A escolha dos modelos mais adequados para cada estudo varia de caso para caso, estando relacionada com os próprios objetivos do trabalho.

A extensão geoespacial HEC-GeoHMS facilita a análise geoespacial necessária à modelação hidrológica criando, com base na informação digital do terreno, uma representação da rede de drenagem. Permite visualizar a informação espacial, as características da bacia hidrográfica, executar análises espaciais e delinear sub-bacias. Esta informação fica desde logo preparada para ser inserida no modelo HEC-HMS.

No ambiente de trabalho do programa são disponibilizadas bases de dados, interfaces de entrada de dados, mecanismos de computação e ainda diferentes opções de apresentação dos resultados (Feldman, 2000).

A utilização dos métodos indiretos para estudar o escoamento tem vindo a ser generalizada, de forma a colmatar a falta de registos hidrométricos em determinadas zonas. Nos modelos de caracterização hidrológica da bacia hidrográfica, o escoamento é calculado a partir da precipitação com base nas características da bacia. Escolhidos os períodos de retorno, é determinada a chuva crítica e transformada em escoamento, gerando as curvas de vazão. A premissa básica na aplicação deste tipo de metodologia é a de que se são utilizados os valores médios de todos os outros parâmetros a frequência da cheia modelada deverá ser sensivelmente igual à frequência da precipitação de projeto.

A simulação da relação precipitação-escoamento nas bacias hidrográficas utiliza a modelação matemática para calcular as várias componentes do ciclo hidrológico: evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, armazenamento de água, descargas dos aquíferos e caudais dos rios.

A informação final permite, entre outras funções, avaliar o impacto socioeconómico da redução do impacto de cheias; dimensionar medidas específicas de controlo de cheias; definir os critérios operacionais de reservatórios e transvazes; desenvolver regulamentação específica no âmbito da gestão das bacias hidrográficas e regulamentar o uso do solo na zona em estudo (Ford *et al.*, 2008).

No geral, as ferramentas de modelação, fornecendo, com maior ou menor erro associado, uma descrição do comportamento de bacias hidrográficas e canais facilitam a tomada de decisão.

## **2.2. A água em Angola**

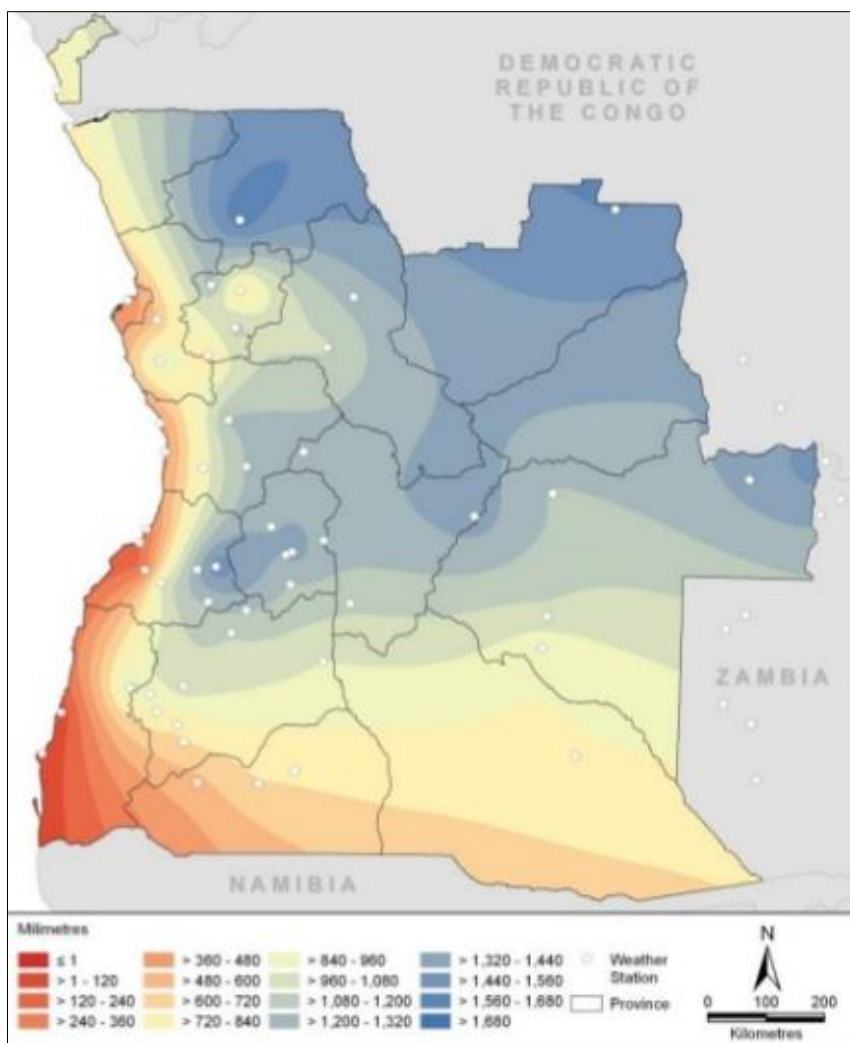
### **2.2.1. Generalidades**

A República de Angola, com uma área de 1.246.700 km<sup>2</sup>, localiza-se na costa ocidental do continente africano, junto ao Oceano Atlântico. O Instituto Nacional de Estatística angolano divulgou os resultados preliminares dos censos realizados em Maio de 2014 que contabilizam cerca de 24 milhões e 300 mil habitantes em Angola.

A corrente de Benguela, juntamente com a zona climática em que se encontra e as características morfológicas são as maiores condicionantes do clima de Angola (Honrado *et al.*, 2011). A zona mais chuvosa corresponde ao nordeste do território, sendo que a quantidade de precipitação diminui em direção ao sul e à costa (McSweeney *et al.*, 2014).

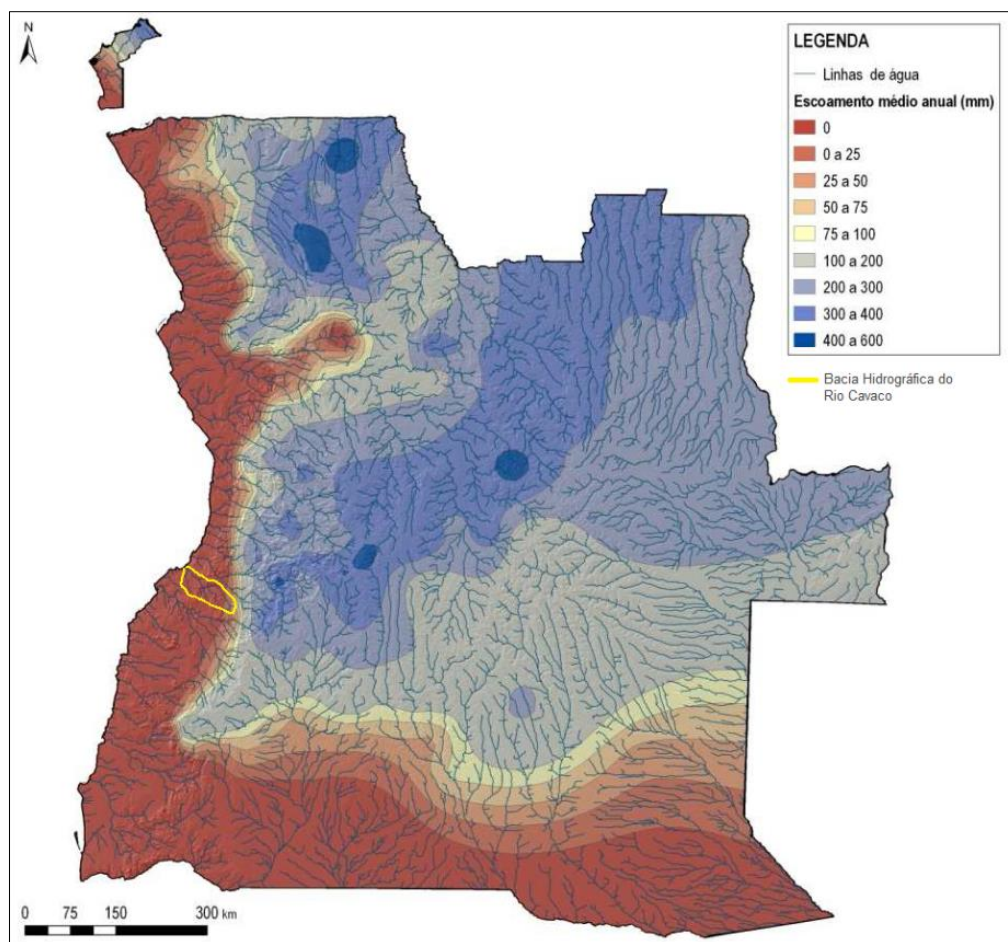
O clima em Angola é caracterizado por duas estações distintas: a época das chuvas, por norma de Setembro a Abril, quente e húmida, e o cacimbo entre Maio e Setembro, estação seca que apresenta temperaturas inferiores. Na Figura 3 é possível analisar a distribuição espacial da precipitação. No litoral, a precipitação aumenta do sul, região do deserto do Namibe, com valores abaixo de 90 mm por ano, para o norte, onde chega a atingir 1000 mm de média anual. Em direção ao interior do país, na zona de transição é possível observar valores entre os 800 mm e os 1200 mm de precipitação média anual. Já os valores de precipitação na zona planáltica variam entre os 1100 mm e os 1500 mm anuais (Diniz, 1968).





**Figura 3 - Distribuição da precipitação média anual em Angola.** Fonte: Cain (2014)

Angola apresenta uma precipitação média anual na ordem dos 1060 mm, evaporação potencial entre 1300 mm e 2600 mm e um escoamento superficial estimado na ordem dos 140 mil milhões m<sup>3</sup> (Quintino, 2011). O movimento na zona de convergência intertropical (do inglês *Inter-Tropical Convergence Zone*, ITCZ) controla a estação das chuvas. O mapa da Figura 4 permite observar a distribuição do escoamento médio anual em todo o território angolano.



**Figura 4 - Mapa de Escoamentos elaborado para todo o território de Angola no âmbito do PLANIRRIGA. Fonte: Honrado *et al.* (2011)**

Sendo dependente da precipitação, o escoamento superficial segue uma distribuição semelhante, encontrando-se os valores mínimos no litoral e zona sul e os máximos nas zonas de altitudes mais elevadas do interior.

### 2.2.2. Enquadramento legal

O regime jurídico da água está definido na Lei das Águas, Lei n.º 6/02, de 21 de Junho, que estabelece os recursos hídricos enquanto recurso natural como bens do domínio público e por isso propriedade do Estado, sendo esta propriedade *inalienável e imprescritível* (Borges *et al.*, 2001). A gestão da água, segundo esta Lei, tem como princípio geral a gestão integrada por bacia hidrográfica, sendo esta a unidade principal. A Lei de Águas prevê para cada unidade a elaboração de Planos Gerais de Desenvolvimento e Utilização de Recursos das Bacias, em concordância com o princípio de múltiplos usos. O Plano Nacional de Recursos Hídricos integra e gere a informação de todas as unidades, devendo fazer prevalecer o princípio do

interesse nacional, por exemplo, em questões de transvazes entre diferentes bacias hidrográficas (Pereira, 2009).

A gestão dos recursos hídricos em Angola está sob a alçada da Direção Nacional de Águas (DNA), que faz parte do Ministério da Energia e Águas (MINEA). A DNA divide-se em três departamentos: Departamento do Abastecimento de Águas e Saneamento (DAAS), Departamento de Licenciamento e Fiscalização (DLF) e Departamento de Recursos Hídricos (DRH). É neste último que está inserida a Direção Nacional de Recursos Hídricos (DNRH), sobre a qual recai a responsabilidade máxima de monitorização dos recursos hídricos (inventariação e Plano Nacional dos Recursos Hídricos), da operação da rede hidrométrica (Plano Diretor da Rede Hidrométrica Nacional), da gestão dos aproveitamentos e do licenciamento para utilização dos recursos hídricos (Quintino, 2011).

A Lei de Águas de Angola impulsionou a descentralização da gestão, estabelecendo um Conselho Nacional e Regionais de Águas para apoiar e coordenar o desenvolvimento do setor. A Lei estabeleceu ainda Administrações das Bacias para as diferentes unidades hidrográficas e um Fundo Nacional de Recursos Hídricos que financiaria a investigação científica na área através, também, de receitas provenientes das taxas.

O mesmo documento definiu a existência de 47 bacias hidrográficas principais e 30 sub-bacias (Quintino, 2013).

No que diz respeito às bacias hidrográficas transfronteiriças, existe o Gabinete para Administração da Hidrografia da Bacia do Rio Cunene (GABHIC), responsável pela gestão integrada dos recursos hídricos no rio Cunene, partilhado com a Namíbia. Angola faz parte ainda da Comissão Permanente da Água da Bacia do Rio Okavango (OKACOM) que integra ainda o Botswana e a Namíbia. A OKACOM delega a cada país a responsabilidade de fornecer dados de monitorização hidrométrica, qualidade da água, transporte de sedimentos e dados meteorológicos respeitante à fração da bacia do rio Cubango/Okavango inserida no seu território (OKACOM, 2010).

No território angolano estão parcialmente presentes as seguintes bacias hidrográficas internacionais: Cuvelai (partilhada com a Namíbia), Zambeze (partilhada com 7 países da SADC, incluindo Moçambique, onde desagua o rio) e Congo/Zaire (partilhada por mais 10 países da África Central) (Quintino, 2011).

Neste sentido, em 2003 teve início o projeto de cooperação de Gestão do Setor Nacional da Água (*National Water Sector Management - NASWASMA*) entre a DNA e a Noruega, envolvendo a Agência Norueguesa da Cooperação para o Desenvolvimento (NORAD) e pela Direção Norueguesa de Recursos Hídricos e Energia (NVE). O objetivo principal do projeto foi o de reforçar a ação da DNA a nível regional, fortalecendo a instituição, através do desenvolvimento das suas capacidades. No âmbito deste projeto foi realizada uma avaliação da rede hidrométrica existente, acompanhada de uma proposta futura (Petterson, 2004).

Em 2004 foi aprovada a Lei do Ordenamento do Território e Urbanismo, Lei n.º 3/04, onde existe uma diferenciação entre os espaços urbanos e os rurais. Esta lei prevê que sejam elaborados planos de ordenamento de território a nível nacional, provincial e intermunicipal. Contudo, esta legislação, a par de outras, como por exemplo, a Lei de Terras e a Lei de Bases do Ambiente, aprovada em 1998, são geralmente ainda desconhecidas pelas comunidades rurais. Embora a legislação que abrange o ordenamento do território salvede o acesso a água e terras aos cidadãos, o número de planos de ordenamento do território é ainda reduzido e é comum os cidadãos mais desfavorecidos economicamente não conhecerem o conteúdo dos planos municipais existentes (Borges *et al.*, 2001).

No mesmo ano, a Resolução do Conselho de Ministros nº 10/04, de 11 de Junho, aprovou o Programa de Desenvolvimento do Setor das Águas e os Planos de Ação de Curto e Médio Prazo.

O Decreto Presidencial n.º 253/10 criou o Instituto Nacional de Recursos Hídricos (INARH) que inserido na Direção Nacional de Recursos Hídricos, tem por objetivo gerir a informação do setor, promover a investigação, e providenciar apoio técnico, assegurando a execução da política angolana na matéria dos recursos hídricos (Quintino, 2011).

Em 2011 eram prioridades da DNRH a recuperação da rede hidrométrica angolana, a agregação da informação existente numa base hidrológica nacional, a implementação do cadastro dos recursos hídricos a nível nacional, o desenvolvimento dos Planos Directores Gerais das principais bacias hidrográficas e a formação de quadros nacionais (Quintino, 2011).

Em Setembro de 2013 encontravam-se já em elaboração os planos de bacia hidrográfica do Cubango, do Cuvelai e do Zambeze, três bacias hidrográficas partilhadas internacionalmente (Quintino, 2013). Encontram-se em preparação outros planos, nomeadamente o Plano Diretor Geral das Bacias Hidrográficas do Cubal de Hanha, Catumbela, Cavaco e Coporolo, onde se insere o caso de estudo deste trabalho.

Têm vindo a ser estabelecidas empresas públicas para gerir o abastecimento de água e o saneamento nas capitais de Província. As Administrações Provinciais criaram também direções de energia e água, dispondo de um departamento específico de águas. Contudo, estes departamentos têm limitações nos recursos humanos, em geral, com falta de pessoal qualificado o que se reflete no desenvolvimento do setor nas restantes localidades das províncias (Roosbroeck, Bettencourt, & Huongo, 2006).

O Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INAMET) é responsável pela informação climatológica, meteorológica e astronómica. Este tem vindo a reforçar as suas capacidades desde o fim da guerra civil, disponibilizando atualmente informação *online* respeitante à rede mínima meteorológica uma vez que se encontra em reestruturação a restante rede. Em 1974 Angola possuía já uma rede de estações com mais de 500 unidades meteorológicas (INAMET,

2014). Em termos de hidrometria, à mesma data, existiam cerca de 200 estações hidrométricas, sendo que em 2011 menos de 5% (10 estações) das mesmas estavam operacionais (Quintino, 2011). Neste momento a rede hidrométrica encontra-se sobre alçada da DNRH.

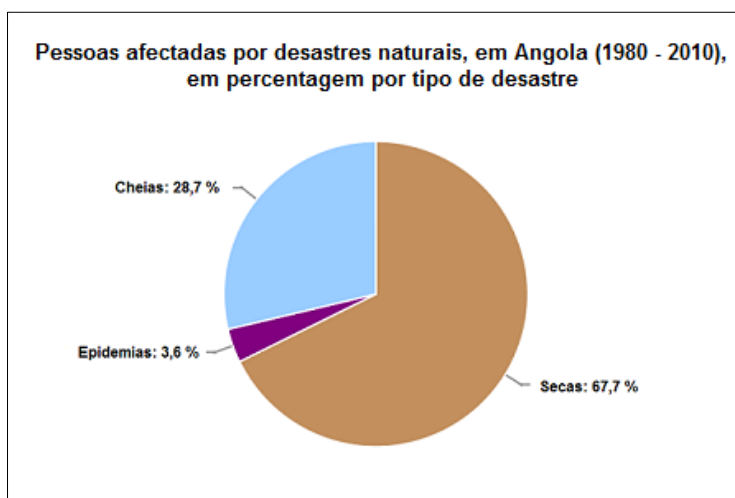
No que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos a sua gestão é da responsabilidade do Instituto Nacional Geológico de Angola, juntamente o Ministério de Geologia e Minas.

Entre as políticas relativas à gestão da água em Angola encontra-se o Plano Nacional Diretor de Irrigação de Angola (PLANIRRIGA) que pretende desenvolver, a nível nacional e regional, com a produção de instrumentos de ação e gestão. Neste trabalho, o país foi dividido em 11 regiões hidrográficas que foram individualmente avaliadas a nível físico, disponibilidade de recursos e situação socioeconómica (Honrado *et al.*, 2011).

### 2.2.3. O risco de cheias em Angola

As condições climáticas e físicas de Angola são favoráveis à ocorrência de cheias em praticamente todos os anos hidrológicos. A situação que afeta mais população, devido à densidade populacional local, é a ocorrência de cheias urbanas na cidade de Luanda, capital angolana. Sendo recorrentes, estando relacionadas sobretudo com a deficiência de drenagem (Pereira, 2009).

A Figura 5 apresenta, em percentagem, o impacto dos diferentes tipos de desastres naturais, mediante a quantidade de pessoas afetadas no país. As cheias são a segunda calamidade a afetar mais pessoas, representando um impacto de 28,7%. As secas têm a maior representatividade, podendo-se admitir que são a maior ameaça à população angolana, sobretudo no sul do país.



**Figura 5 - Percentagem por tipo de desastre natural das pessoas afetadas de que houve comunicação. Adaptado de CRED (EM-DATA), 2008**

Estando Angola integrada na Comunidade para o Desenvolvimento Sul-africano (SADC – *Southern African Development Community*), encontra-se abrangida pelos desenvolvimentos que esta comunidade está a fazer no que diz respeito à redução de riscos e estratégias de gestão do risco de inundações. A SADC dispõe desde 2011 de uma Plataforma Regional para a Redução do Risco nos Desastres, que está a ser reforçada por um projeto apoiado pela Alemanha, Reino Unido e Austrália, inserido no programa “Gestão Transfronteiriça da Água na SADC”. Este projeto tem como principais objetivos a reabilitação das estações hidrométricas da WHYCOS (World Hydrological Cycle Observing System), o desenvolvimento de ferramentas de apoio à gestão do risco de cheias do Centro de Serviços Climáticos da SADC, a aplicação das ferramentas nas bacias hidrográficas de gestão partilhada e, por fim, a apreciação do nível de preparação atual do SADC para a redução do risco de cheia (SADC, 2013). Contudo, as bacias hidrográficas inseridas totalmente em território angolano acabam, em termos do estudo e da gestão das mesmas, por ter menos atenção.

No que diz respeito à gestão do risco de cheia e inundações, não existe ainda um sistema de aviso prévio generalizado no país. Após ter sido aprovada a Lei de Base da Proteção Civil em Angola, Lei 28/2003 de 17 de Novembro, foi iniciado o desenvolvimento de um sistema de alerta rápido de cheias (Tonecas, 2012). No âmbito do programa do governo de controlo e prevenção de desastres naturais, a província de Benguela foi escolhida para uma experiência piloto no rio Catumbela, onde foi instalada a estação hidrométrica de “Alerta Rápida de Enchantes” do Caiave. O sistema, implementado com a cooperação do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), prevê a transmissão em tempo real da informação local para o Centro Nacional de Proteção Civil, em Luanda, via satélite e via internet. A responsabilidade da manutenção das estações que servem o objetivo do sistema de alerta é da responsabilidade do Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (Tonecas, 2012).

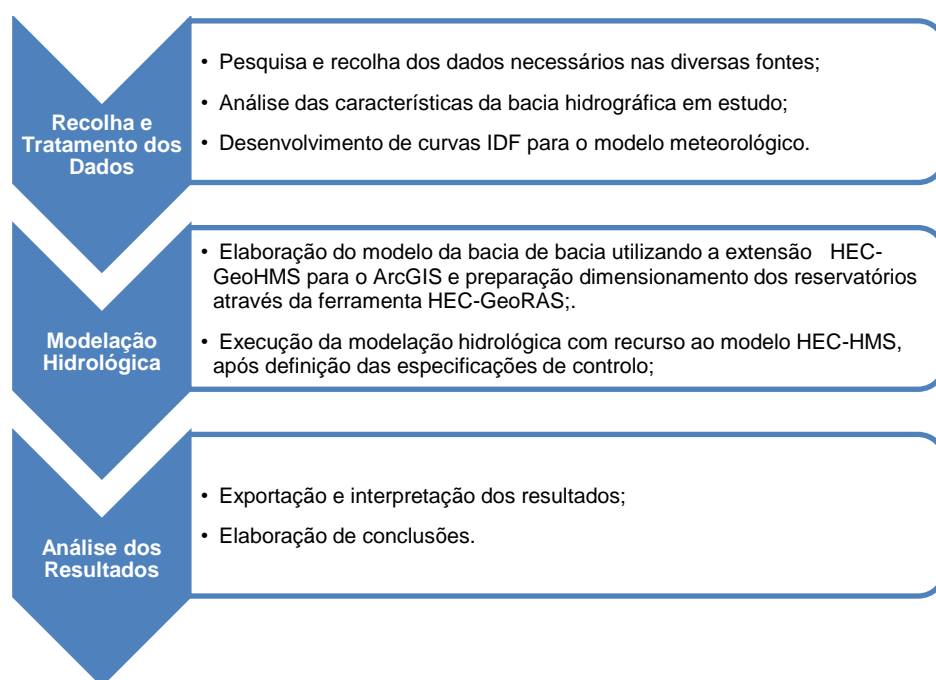
A principal prioridade a nível do setor é a melhoria dos meios técnicos, da comunicação e o reforço das infraestruturas. É recomendado num relatório da União Europeia de 2006 em que se avaliou o perfil ambiental de Angola, a interligação à rede meteorológica nacional (INAMET) e à rede hidrométrica (DNRH) com o objetivo de fortalecer o sistema de alerta prévio em diversos pontos do país. É ainda defendido como medida para melhorar a monitorização e a capacidade de resposta, a implementação de campanhas de formação em diversos setores da sociedade. Esta formação deve incluir formação para a prevenção e para a ação, devendo ser acompanhada de uma estratégia de sensibilização pública para o assunto. Recomenda-se ainda, no âmbito do mesmo trabalho, a criação de um *centro de controlo de proteção civil para gestão e arquivo de dados relativos à prevenção/resposta a acidentes e catástrofes*. Por fim, foi ainda recomendado a implementação do Programa de Ação Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (NAPA), no âmbito do Protocolo de Quioto (Roosbroeck *et al.*, 2006).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Nota introdutória

Este capítulo descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho, começando por abordar o processo de recolha e tratamento dos dados relativos à zona em estudo. A principal ferramenta utilizada na caracterização da bacia hidrográfica foi o programa de informação geográfica ArcGIS 10.1, com a extensão HEC-GeoHMS 10.1. Para a modelação hidrológica foi utilizado o programa HEC-HMS 4.0, cujos métodos escolhidos serão descritos neste capítulo. A informação geográfica foi integrada no modelo matemático para simulação de chuvas intensas de curta duração para diferentes períodos de retorno – 5, 10 e 25 anos. Já no dimensionamento das bacias de retenção para teste foi utilizada extensão HEC-GeoRAS para o ArcGIS.

A escolha dos períodos de retorno a serem modelados foi consequência da informação encontrada sobre a intensidade das precipitações.



**Figura 6 - Fluxograma da metodologia de trabalho seguida**

O esquema da Figura 6 resume as etapas e ações necessárias na realização do presente trabalho.

### 3.2. Recolha de dados

A pesquisa de séries de dados associadas às estações hidrométricas localizadas na bacia hidrográfica em estudo foi feita não só através da informação disponibilizada pelas entidades responsáveis angolanas como em arquivos históricos em Lisboa. No entanto, não foram encontrados registos históricos para a bacia hidrográfica do rio Cavaco, embora esses dados existam para outras bacias de Angola (Bjoru, 2004). Encontrou-se referência a uma estação hidrométrica na bacia hidrográfica do rio Cavaco, em Guvriri, a 58 quilómetros da linha de costa a uma cota de 562 metros. Construída antes da década de 70, encontra-se de novo em funcionamento desde 2009, embora com constantes interrupções devido a problemas técnicos (Dinis *et al.*, 2013).

Devido a esta inacessibilidade a séries hidrométricas nas bacias hidrográficas em estudo não foi possível obter os hidrogramas de cheia com valores observados. No que diz respeito aos dados meteorológicos, a disponibilidade de dados recentes compreende um período de tempo curto, devido à inoperação das estações durante a guerra civil angolana. Como tal, optou-se pelo trabalho com dados disponíveis em arquivos anteriores a 1976, de forma a serem construídas séries de precipitação representativas. Os dados encontram-se compilados na publicação anual “*Elementos Meteorológicos e Climatológicos – Angola*” e foram parcialmente recolhidos *on-line* através da Administração Norte-Americana dos Oceanos e Atmosfera (NOAA do inglês *National Oceanic and Atmospheric Administration*) e presencialmente na biblioteca do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e no Arquivo Histórico Ultramarino (serviço do Instituto de Investigação Científica Tropical - IICT). A falta de representatividade nas séries de dados levou a que alguns dos 56 postos, inicialmente considerados e analisados, não fossem posteriormente utilizados no seguimento do trabalho.

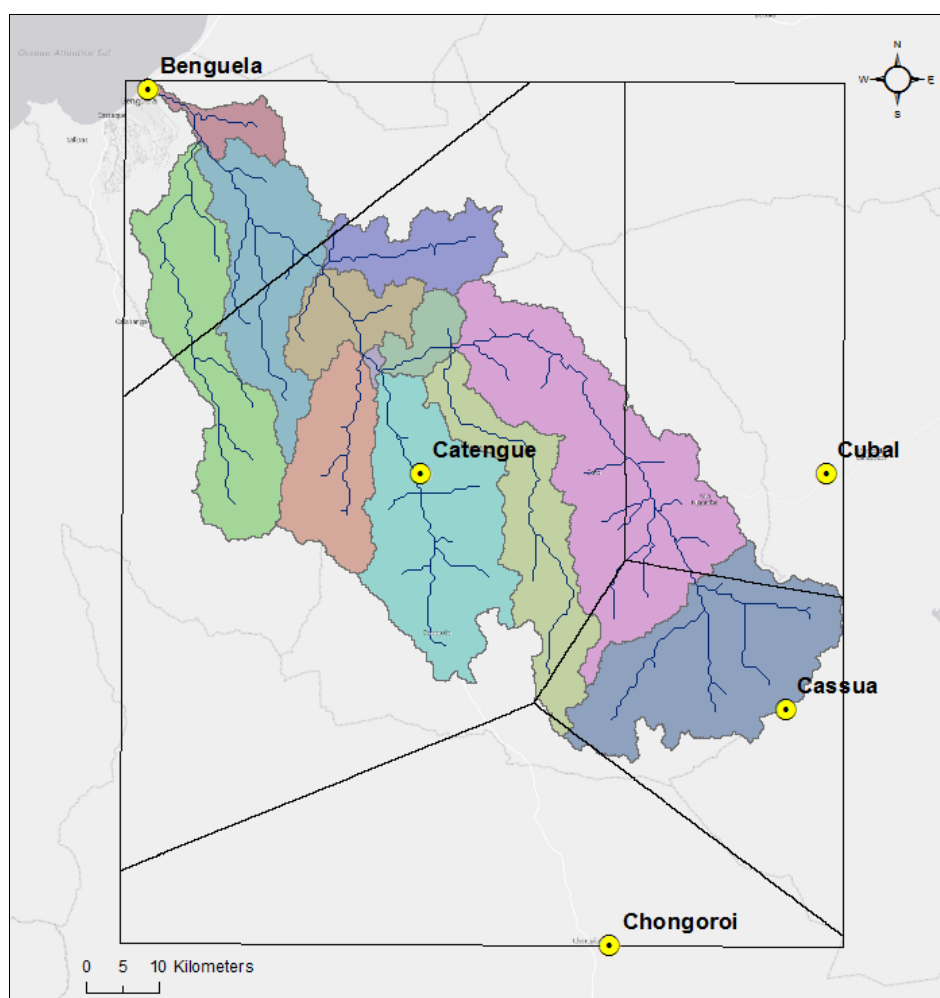
Após análise geográfica das estações meteorológicas e udométricas disponíveis na zona e avaliação da disponibilidade de dados, selecionaram-se as estações descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Caracterização geral das estações udométricas utilizadas no estudo**

<b>Estação</b>	<b>Latitude (decimal)</b>	<b>Longitude (decimal)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Anos em falta 1947-1968</b>
<b>Benguela</b>	-12,566	13,383	5	2
<b>Cassua</b>	-13,316	14,200	980	15
<b>Catengue</b>	-13,033	13,750	537	3
<b>Chongorói</b>	-13,600	13,983	700	6
<b>Cubal</b>	-13,033	14,250	910	4



Foram digitalizados os valores referentes à precipitação média anual (mm) e à máxima diária anual (mm) para o período compreendido entre 1947 e 1968 (21 anos). A estação de Chongorói foi incluída devido à disponibilidade de séries longas de dados, mas devido à sua distância grande relativamente à bacia acabou por ter uma influência mínima, após aplicação do método de Thiessen (ver mapa da Figura 7). Este define áreas de influência, delimitadas através da análise geométrica dos pontos próximos a cada estação, com base na construção de uma rede de triângulos (rede de Delaunay) entre as estações e no desenho de mediatrizes (Hipólito & Vaz, 2011). A ferramenta HEC-GeoHMS disponibiliza uma função para traçar os polígonos de Thiessen automaticamente a partir da localização das estações.



**Figura 7 - Localização dos postos com influência na bacia hidrográfica do rio Cavaco e respetivos polígonos de Thiessen**

Para a caracterização física básica da bacia hidrográfica foi utilizado o MDT (Modelo Digital Terrestre) utilizado foi o que teve origem na missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Esta missão em 2000 resultou de um esforço conjunto de várias entidades para caracterizar o relevo dos continentes através da técnica de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR). Os dados têm sido processados e disponibilizados pela Agência Espacial Norte-

americana (NASA) numa resolução de 1arcsec (cerca de 30 metros junto ao equador) para os Estados Unidos da América (EUA), e de 3 arcsec (aproximadamente 90 metros) para o resto do mundo (Farr & Kobrick, 2000). A coesão da sua informação e o facto de ser de livre utilização foram os motivos da escolha.

Para a caracterização de ocupação e uso do solo na bacia hidrográfica do rio Cavaco foi utilizada a informação em *shapefile* com uma resolução de 300 metros disponibilizada pela base de dados mundial Globcover, disponível no *site* da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, do inglês *Food and Agriculture Organization*). Utiliza para classificação 46 classes do Sistema para Classificação da Ocupação do Solo (LCCS, do inglês *Land Cover Classification System*) (FAO/ESA, 2009).

Relativamente à análise do tipo de solo, a *shapefile* da informação compilada no âmbito do projeto *Harmonization of Soil and Terrain Information for the Southern African Region* (SOTER-SAF) foi obtida *online* no site da fundação World Soil Information (ISRIC). Esta base de dados é considerada mais fiável do que o Mapa dos Solos do Mundo (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012).

Na Tabela 4 é feito um resumo das fontes de dados utilizadas na aquisição de cada tipo de dados para construir o modelo.

**Tabela 4 – Resumo das fontes dos dados utilizados na modelação**

<b>Tipo de dados</b>	<b>Fonte</b>
Precipitação – valores anuais	<i>Anuário Elementos Meteorológicos e Climatológicos Angola (1947-1968)</i>
Precipitação – curvas IDF Luanda	<i>Azevedo, A (1952)</i>
MDT	<i>SRTM-3arc (2000)</i>
Classificação do solo	<i>SOTER-SAF/ ISRIC (2012)</i>
Ocupação e Uso do Solo	<i>Globcover Regional - Land cover of Angola (2009)</i>

### **3.3. Tratamento de dados**

#### **3.3.1. Cálculo dos fatores que caracterizam a bacia hidrográfica**

A área de drenagem, o perímetro e o comprimento das bacias hidrográficas foram obtidos através do uso da ferramenta de análise espacial HEC-GeoHMS. Considera-se como comprimento da bacia hidrográfica o comprimento do seu curso de água mais longo.

#### **Tempo de concentração**

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica,  $t_c$ , é considerado uma característica constante da bacia e calcula-se para determinada secção do curso de água. Representa o tempo necessário para que toda a bacia contribua em simultâneo para o escoamento superficial na secção em estudo (Lencastre & Franco, 2003). Foi calculado através das fórmulas 1 e 2 tendo sido depois utilizada a média dos dois valores. Os resultados encontram-se no capítulo 5.

*Fórmula de Giandotti*

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,80\sqrt{h_m}} \quad (1)$$

Onde  $t_c$  corresponde ao tempo de concentração (h),  $A$  à área da bacia hidrográfica ( $\text{km}^2$ );  $L$  ao comprimento do rio principal (km) e  $h_m$  à altura média da bacia hidrográfica (m).

*Fórmula de Kirpich*

$$t_c = 0,06628 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (2)$$

Onde  $S$  é o declive médio (m/m) e  $L$  o comprimento do rio principal (km).

A frequência e intensidade das cheias numa bacia hidrográfica dependem, entre outros fatores, da forma de cada bacia. Assim, nas bacias hidrográficas cujo formato se aproxima mais de um círculo, os tempos de concentração serão menores e, conseqüentemente, os caudais de ponta para precipitações intensas de curta duração serão maiores.

### **Índice de Gravelius**

Através da equação 3 obtém-se o índice de compacidade ou índice de Gravelius,  $K_c$ . Este permite avaliar a forma, relacionando o perímetro de cada bacia hidrográfica com o perímetro de um círculo igual à área da bacia (Lencastre & Franco, 2003). Quanto mais perto do valor mínimo 1, mais circular é a bacia (Hipólito & Vaz, 2011).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Onde  $P$  é o perímetro da bacia hidrográfica (km) e  $A$  a área da bacia hidrográfica ( $\text{km}^2$ ).

### Fator de forma

O fator de forma,  $K_f$ , é outro índice de avaliação que utiliza a forma da bacia hidrográfica, sendo calculado pela equação 4. Permite, também, avaliar a tendência para a ocorrência de cheias sendo que quanto mais baixo for o seu valor, menor é a sua vulnerabilidade à ocorrência de cheia.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (4)$$

Onde A representa a área da bacia hidrográfica ( $\text{km}^2$ ) e L representa o comprimento da bacia hidrográfica (km).

### Retângulo equivalente

O retângulo equivalente da bacia hidrográfica é o retângulo cuja área e perímetro são os mesmos da bacia hidrográfica (Lencastre & Franco, 2003). O lado maior ( $L_e$ ) e o lado menor ( $l_e$ ) do retângulo equivalente são expressos, respetivamente, pelas equações 5 e 6.

$$L_e = \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (5)$$

$$l_e = \frac{P}{4} - \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (6)$$

### Índice de alongamento

O índice de alongamento de uma bacia hidrográfica, calculado pela equação 7, permite avaliar a forma da bacia hidrográfica, utilizando o retângulo equivalente. As bacias hidrográficas com valores superiores a 2 podem ser classificadas como alongadas.

$$K_L = \frac{L_e}{l_e} \quad (7)$$

### Densidade de Drenagem

A equação 8 permite calcular a densidade de drenagem da bacia hidrográfica ( $\lambda$ ) que relaciona o comprimento total dos cursos de água da bacia hidrográfica e a área total da mesma. Pode considerar-se que o índice varia entre 0,5 km/km<sup>2</sup>, bacias mal drenadas, até 3,5 km/km<sup>2</sup>, no caso de bacias muito bem drenadas (Lencastre & Franco, 2003).

$$\lambda = \frac{\Lambda}{A} \quad (8)$$

Onde A é a área da bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>) e  $\Lambda$  o comprimento total somado de todas as linhas de águas (km).

### Percurso médio do escoamento superficial

O percurso médio sobre o terreno ( $\bar{P}_s$ ), em quilómetros, é calculado através da equação 9. Representa a distância média que as gotas de chuva percorreriam caso o escoamento fosse em linha reta desde o ponto de queda até à linha de água mais próxima (Lencastre & Franco, 2003).

$$\bar{P}_s = \frac{1}{4\Lambda} \quad (9)$$

Onde  $\Lambda$  o comprimento total somado de todas as linhas de águas (km).

### Caraterísticas do relevo

Após reclassificação da altitude na bacia hidrográfica, obtida através do MDT, em 100 classes de igual tamanho (15,95m), procedeu-se à construção da curva hipsométrica.

A altura média da bacia hidrográfica ( $h_m$ ) calcula-se subtraindo à altitude média a altitude mínima, referentes à secção em estudo. Por sua vez, a altitude média calcula-se por meio da equação 10 (Oliveira, 2008):

$$Z_m = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (z_i + z_{i+1}) A'_i \quad (10)$$

Onde  $Z_m$  representa a altitude média (m), A é a área da bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>),  $z_i$  a curva de nível com altitude i (m) e  $z_{i+1}$  a curva de nível seguinte, sendo  $A'_i$  a área entre duas curvas de nível consecutivas (km<sup>2</sup>).

### **Cálculo do caudal pela fórmula racional**

O cálculo do caudal de ponta de cheia inicialmente através da fórmula racional, equação 11, permite uma perceção direta sobre os valores a esperar (Lencastre & Franco, 2003). No final, permite uma comparação com os valores resultantes do modelo para os períodos de retorno em estudo.

$$Q_p = c\bar{i}A \quad (11)$$

Onde  $Q_p$  representa o caudal de ponta de cheia ( $m^3/s$ ) para determinado período de retorno (T),  $c$  é o coeficiente de escoamento adimensional que diz respeito às características do terreno,  $A$  é a área da bacia hidrográfica ( $m^2$ ) e  $\bar{i}$  diz respeito à intensidade média de precipitação ( $m/s$ ) com duração igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica e para o respetivo T.

#### **3.3.2. Análise estatística dos dados udométricos**

No preenchimento das séries de dados de precipitação anual para cada estação, utilizou-se a regressão linear, pelo critério dos mínimos quadrados, estimando assim a precipitação no posto B, com falhas na série, a partir dos valores de precipitação do posto A.

$$P_B = a + b.P_A \quad (12)$$

Em comparação com a estação mais próxima e altura o mais semelhante possível, pela equação 12, foram preenchidas as lacunas existentes no período 1947-1978 (21 anos).

Foram assumidos à partida dois pressupostos: que os valores em falta têm propriedades estatísticas semelhantes aos dados disponíveis e que existe correlação espacial na ocorrência de precipitação entre estações com alturas semelhantes.

### **Análise de precipitações intensas de curta duração para construção do modelo meteorológico**

Como tal foi necessário a construção de expressões de IDF (intensidade-duração-frequência) locais, com base nos valores máximos diários anuais.

O período de retorno (equação 13) corresponde ao intervalo médio de tempo dentro do qual determinado acontecimento é igualado ou excedido em média uma só vez (Lencastre & Franco, 2003).

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (13)$$

Em que T corresponde ao período de retorno em anos.

Para análise da distribuição das precipitações máximas anuais em 24 horas, para os diferentes períodos de retorno, recorreu-se à Distribuição Assimptótica de Extremos Tipo I, também conhecida por Distribuição de Gumbel (Lencastre & Franco, 2003).

A variável aleatória tem, pela distribuição de Gumbel, como densidade de probabilidade a equação 14.

$$f(x) = ae^{-(x-x_0)-e^{-a(x-x_0)}} \quad (14)$$

E a sua função de distribuição:

$$F(x) = e^{-e^{-a(x-x_0)}} \quad (15)$$

Após a aplicação do logaritmo à equação 15 obtém-se a equação 16, que corresponde à altura de precipitação esperada, consoante o período de retorno.

$$x = x_0 - \frac{1}{a} \ln\{-\ln[F(x)]\} \quad (16)$$

Através da média ( $\mu$ ) e da variância ( $\sigma^2$ ) da distribuição, respetivamente equações 17 e 18, foram calculadas as constantes a e  $x_0$ , a moda da amostra.

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2}{6a^2} \quad (17)$$

$$\mu = x_0 + \frac{0,577}{a} \quad (18)$$

Não existem registos udográficos da zona em estudo com detalhe suficiente que permitam aferir diretamente curvas IDF para chuvadas inferiores a 24 horas. A informação encontrada com mais afinidade ao presente trabalho consiste num relatório elaborado pelo Engenheiro Ário Lobo de Azevedo. Com base no registo udográfico de 11 anos (1941 a 1951) da estação do Observatório de João Capelo, em Luanda, foram ajustadas curvas para períodos de retorno de

1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 e 25 anos, com base em tempos de precipitação entre 10 minutos e 5 horas, cujas constantes se encontram na Tabela 5 (Azevedo, 1952).

**Tabela 5 - Curvas de possibilidade udométrica construídas por Azevedo para Luanda**

<b>Período de retorno (anos)</b>	<b><math>y = a x^n</math></b>	
	<b>a</b>	<b>n</b>
<b>1</b>	5,5	0,354
<b>2,5</b>	8,3	0,33
<b>5</b>	11,6	0,308
<b>7,5</b>	14	0,296
<b>10</b>	16,1	0,288
<b>15</b>	19,4	0,276
<b>25</b>	24,6	0,261

Foi estabelecido um quociente relacional entre os valores de altura máxima em Luanda associados aos diferentes tempos de chuvada inferiores a 24 horas, para cada período de retorno (por exemplo, relação 24h/5h). Nas estações em estudo, após ajustamento dos valores máximos diários à lei de Gumbel e cálculo das alturas máximas, foi aplicado o critério de relação direta entre os tempos de chuvada estabelecido para Luanda de forma a inferir valores de altura máxima para tempos de chuvada inferiores a 24 horas. Desta forma, obtiveram-se curvas de possibilidade udométrica com duração inferior a 24h. As curvas de possibilidade udométrica de Luanda (Azevedo, 1952) e as curvas construídas para cada estação no âmbito deste trabalho encontram-se no Anexo 1.

### **3.3.3. Preparação do modelo da bacia em ArcGIS**

O MDT foi processado e trabalhado em ambiente ArcGIS com a extensão Hec-GeoHMS. Após projetar o *raster* no sistema de coordenadas WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33S, apropriado à zona em estudo, transformou-se o modelo em GRID.

A construção do modelo em ambiente de SIG inclui os seguintes passos: preenchimento das depressões ou falhas no MDT (*fill sinks*) de forma a permitir a fluidez do escoamento (MDT correto do ponto de vista hidrológico); definição da direção do escoamento (*flow direction*) para cada célula (o algoritmo especifica 8 possíveis direções correspondendo 1 a este, 2 a sudeste, 4 a sul, 8 a sudoeste, 16 a oeste, 32 a noroeste, 64 a norte e 128 a nordeste); estruturação do



escoamento acumulado (*flow accumulation*), definição de fluxos a partir do escoamento acumulado (*stream definition*), segmentação dos fluxos através das confluências (*stream segmentation*), delimitação das sub-bacias com base nos segmentos (*catchment grid delineation*), vectorização dos segmentos em polígonos (*catchment polygon processing*), definição da linha de drenagem (*drainage line processing*), agregação das sub-bacias a cada confluência (*adjoint catchment processing*). A partir daí é possível definir que sub-bacias se pretende manter no modelo e analisar as características geométricas da bacia hidrográfica.

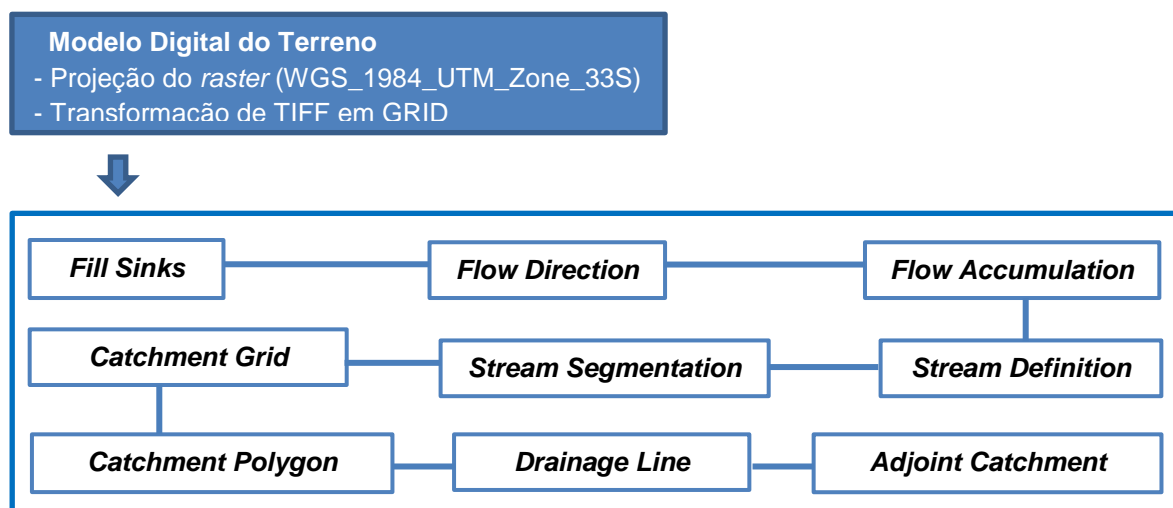


Figura 8 - Fluxo de trabalho na análise do MDT

### 3.4. Simulação hidrológica

Neste trabalho, o modelo matemático escolhido para transformação da precipitação em escoamento foi o HEC-HMS, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*, USACE).

O modelo de bacia necessita da definição do método de cálculo das perdas, de transformação precipitação-escoamento, de caracterização do escoamento base e da propagação nas linhas de água.

A escolha deste modelo prende-se com o facto de ser um modelo de livre utilização, reconhecido pela sua robustez, resultante de cerca de 30 anos de experiência em modelação hidrológica (Feldman, 2000; Yuan & Qaiser, 2011). Para calibrar o modelo seria importante, quer a disponibilidade de dados hidrométricos, quer a existência do registo de eventos de precipitação no passado com frequências semelhantes (Ford *et al.*, 2008).

O modelo HEC-HMS é uma ferramenta adequada ao presente trabalho uma vez que permite a determinação das pontas de cheia, valores máximos associados aos caudais de cheia e

elaboração de hidrogramas de cheias, para diferentes probabilidades de excedência (Ford *et al.*, 2008).

As principais componentes do modelo dizem respeito ao modelo físico da bacia hidrográfica, o modelo meteorológico e as especificações de controlo. A simulação calcula o escoamento que ocorre na bacia modelada como resultado da precipitação, caracterizada no modelo meteorológico. As especificações de controlo definem o período de tempo da simulação e o passo a ser usado. O modelo representativo das características físicas da bacia hidrográfica permite a inserção e conexão dos seguintes elementos: sub-bacias, canais, junções, pontos de origem, pontos de saída, reservatórios e desvios.

Na análise de cheias deve-se considerar durações de eventos de precipitação iguais ou superiores ao tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo para que toda a área da bacia esteja a contribuir, em simultâneo, para o escoamento na secção de referência. Neste caso, é utilizada uma duração de 24 horas nas simulações realizadas devido ao tempo de concentração da bacia hidrográfica estar na ordem das 22 horas (Capítulo 5, página 55). A modelação tem início na precipitação que entra no modelo através das sub-bacias. Para estas são definidos, à partida, os métodos de cálculo das perdas de precipitação, do escoamento superficial e do escoamento base. O modelo considera que a precipitação e a infiltração são uniformes em cada área de drenagem definida.

Após iniciar um novo projeto no HEC-HMS procede-se á importação do modelo físico da bacia criado anteriormente no ArcGIS, com recurso à extensão HEC-GeoHMS. Em seguida é construído um modelo meteorológico e definidas as especificações de controlo.

### **Modelo de perdas de precipitação**

O programa permite especificar a percentagem de área impermeável para cada sub-bacia, onde toda a precipitação é transformada em escoamento, não havendo perdas de precipitação. Para a restante superfície o modelo disponibiliza vários métodos de cálculo de perdas de precipitação, entre eles o *Green and Ampt*, *Initial and Constant Rate*, *Deficit and Constant Rate* e o modelo SCS (*Soil Conservation Service*) CN (*Curve Number*, número de escoamento). Neste trabalho é utilizado este último devido ao facto de ser um modelo de fácil compreensão e utilização, amplamente utilizado em estudos hidrológicos.

Este método estima a precipitação efetiva (equação 19) em função da precipitação acumulada  $P_e$  até ao momento, retenção potencial máxima ( $S$ ) e perdas iniciais ( $I_a$ ). Para calcular a retenção potencial máxima é necessário analisar a cobertura do terreno, a textura do solo e a condição de humedecimento do solo, de forma a calcular o parâmetro CN. As razões empíricas encontradas pelo SCS são as das equações 20 e 21 (Feldman, 2000).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (19)$$

$$I_a = 0,2S \quad (20)$$

$$S = \frac{254000}{CN} - 254 \quad (21)$$

Onde CN é o número de escoamento.

#### *Cálculo do número de escoamento*

Para o cálculo do número de escoamento (em inglês *Curve Number*) foi utilizada a classificação quanto ao grupo hidrológico segundo os fatores presentes na Tabela 6.

**Tabela 6 - Grupo hidrológico do solo. Fonte: Natural Resources Conservation Service, 2007**

<b>Grupo Hidrológico do Solo</b>	<b>Capacidade de Escoamento</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Textura típica do Solo</b>
<b>A</b>	Baixa	< 10	> 90	Arenosa
<b>B</b>	Moderadamente baixa	10 - 20	50 - 90	Areno-franca Franco-arenosa
<b>C</b>	Moderadamente alta	20 - 40	< 50	Franca Franco-limosa Franco-argilo-arenosa Franco- argilosa Franco-argilo-limosa
<b>D</b>	Alta	> 40	< 50	Argilo-arenosa Argilo-limosa Argilosa

Para a determinação dos caudais de cheia, considera-se geralmente um número de escoamento respeitante a condições médias de humedecimento do solo superfície AMC-III (do inglês *Antecedent Moisture Conditions*), correspondentes a um solo bem humedecido anteriormente (Lencastre & Franco, 2003). Contudo, a tabela consultada diz respeito a condições AMC-II, existindo a necessidade de fazer a correlação para as condições AMC-III através da equação 22, estudada pelo SCS.

$$CN(AMC\ III) = \frac{23 \times CN\ (AMC\ II)}{10 + 0,13 \times CN\ (AMC\ II)} \quad (22)$$

Foi utilizado o valor médio para cada sub-bacia hidrográfica, com base no cruzamento de informação disponível sobre a textura do solo e a ocupação dos terrenos. Os valores encontram-se representados na Figura 26 e Tabela 11 (Capítulo 5).

O *lag time*, ou tempo de atraso, foi calculado através da relação da equação 23, estudada pelo SCS e recomendada pelo HEC-HMS (Scharffenberg, 2013).

$$t_{lag} = 0,6 t_c \quad (23)$$

### **Modelo de transformação para precipitação e escoamento**

Na transformação de precipitação em escoamento foi utilizado o modelo do hidrograma unitário do método SCS. Este determina o hidrograma de cheia com base no tempo de resposta de cada sub-bacia ( $t_{lag}$ ), utilizando uma representação discreta do excesso de precipitação.

### **Modelo de propagação da onda de cheia**

Para fazer o *routing*, a modelação de propagação da onda de cheia nos canais, foi aplicado o modelo Lag devido à escassez de informação suficiente relativa às secções de escoamento para aplicar o método de Muskingum ou Muskingum-Cunge. O modelo Lag utiliza como parâmetro de entrada o tempo de percurso e os perfis longitudinais dos segmentos.

### **Modelo meteorológico**

O programa HEC-HMS divide o modelo meteorológico em três componentes: precipitação, evaporação e degelo (Feldman, 2000). Uma vez que a zona em estudo se encontra num local onde não ocorre precipitação de neve, o degelo não é considerado. A evapotranspiração é desprezada devido ao curto intervalo de tempo dos episódios a modelar.

Assim, o modelo meteorológico construído tem por base unicamente a precipitação. Adotou-se como método de caracterização da precipitação e construção dos hietogramas de projeto o *Frequency Storm*, com diferenciação para cada sub-bacia (o modelo permite esta opção). Este método constrói automaticamente o hietograma para o tempo de chuvada escolhido, 24 horas, conforme as precipitações ponderadas calculadas estatisticamente para os períodos de retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente probabilidades de 20%, 10% e 4%. Mediante a influência das estações udométricas consideradas neste estudo, analisada através do método dos polígonos de Thiessen, foi contabilizada a influência para cada sub-bacia, inserindo-se no modelo, por fim, a precipitação ponderada para cada sub-bacia.

Foi utilizado um passo de 15 minutos para construção do hietograma, com o pico de intensidade situado a meio (50%) do tempo de chuvada.

A opção *Frequency Storm* não permite a definição de probabilidades associadas a períodos de retorno de 2.5 (40%), 7.5 (13,3%) e 15 anos (6,6%), tendo sido este o motivo pelo qual não foram utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

### Especificações de controlo

As especificações de controlo abrangem a escolha dos períodos de tempo dos acontecimentos a modelar, com definição do intervalo ou passo de processamento dos dados que o modelo deve considerar. Neste caso foi utilizado um período de tempo de 24h, definido hipoteticamente em termos de calendário. O passo utilizado foi, para todos os cenários, de 15 minutos.

### Exercício das alturas do escoamento

O objetivo deste exercício foi o de comparar os resultados obtidos após implementação do modelo com a única informação histórica encontrada: o rio Cavaco aumenta o seu caudal de forma repentina em 7 metros.

No exercício de cálculo de alturas de água e respetivos valores de escoamento admitiu-se escoamento em regime uniforme. Definiu-se uma secção na parte do rio que atravessa a cidade de Benguela através da análise do MDT e de fotografias locais. Para o cálculo da altura uniforme foi utilizada a fórmula de Manning-Strickler, função da altura de água, presente na equação 24 (Lencastre, 1996). Foi utilizada uma secção de forma trapezoidal.

$$\frac{Q}{\sqrt{i}} = K_s A R^{2/3} \quad (24)$$

Em que Q é o caudal na secção (m<sup>3</sup>/s), K<sub>s</sub> o coeficiente de rugosidade da fórmula de Strickler (m<sup>1/3</sup>/s), A é a área da secção molhada (m<sup>2</sup>), R o raio hidráulico correspondente (m) e i o declive de fundo na secção em estudo.



## 4. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAVACO

### 4.1. Introdução geral

A bacia hidrográfica do Rio Cavaco, do tipo exorreica, localiza-se em Benguela e é uma das 23 bacias hidrográficas presentes na província (Figura 9). É considerada das mais importantes, juntamente com as bacias do Balombo, Cubal do Lumbo, Catumbela, Coporolo e Equimina (Centro de Estudos de Pedologia Tropical, 1981). Com um alongamento de sudeste para noroeste a bacia hidrográfica do rio Cavaco tem uma área de 3978 km<sup>2</sup>. A norte e nordeste é limitada pela bacia hidrográfica do rio Catumbela, a sul pela bacia hidrográfica do rio Coporolo e a oeste pelo oceano Atlântico.

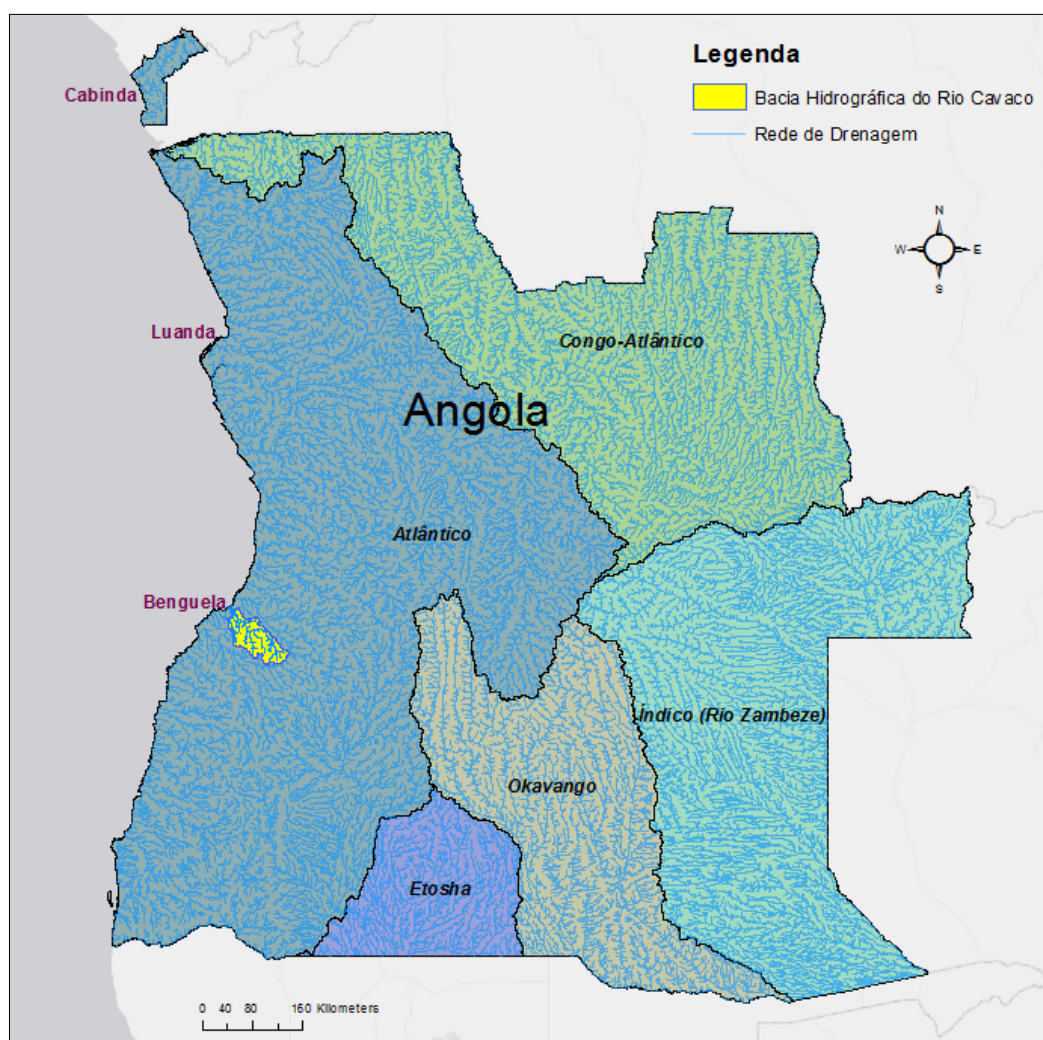


Figura 9 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cavaco em Benguela, Angola e vertentes gerais do escoamento em Angola com a respetiva rede de drenagem

Inserida totalmente na província de Benguela, a bacia hidrográfica do rio Cavaco desenvolve-se quase completamente na Zona de Transição, tendo na margem esquerda o rio Catengue, o principal afluente do rio Cavaco, que à cabeceira tem o nome de rio Halo (Centro de Estudos de Pedologia Tropical, 1981).

O rio Cavaco desagua na cidade de Benguela, a qual tem sofrido historicamente inundações sempre que a montante ocorre precipitação significativa para a ocorrência de cheia no rio Cavaco. Este apresenta um regime intermitente, geralmente com caudal superficial apenas nos meses de Março e Abril. Após a época das chuvas o lençol freático desce a um nível inferior ao do leito, terminando o escoamento superficial (Lencastre & Franco, 2003).

A maior parte da população que habita na zona geográfica em estudo concentra-se no litoral, na cidade de Benguela. O estudo de 2005 elaborado pela Sweco a pedido da DNA previa um aumento intenso da população na região da bacia hidrográfica do rio Cavaco. De acordo com os resultados preliminares dos Censos realizados em 2014, o município de Benguela tem uma população de 513.441 habitantes (Ana Paula Jordão do INE Angola, 2014).

Consequentemente, a urbanização e impermeabilização tem tendência a ser cada vez mais acentuadas, assim como a procura de água para os diferentes usos, contribuindo para um aumento da influência antrópica no regime natural do rio.

Os resultados do presente estudo são decorrentes das condições naturais do rio e correspondem à situação atual, uma vez que não foi possível identificar nenhuma intervenção humana significativa tendo em vista a modelação de cheias. O transvaze ( $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) identificado na zona montante da bacia hidrográfica, rio Halo, é controlado na bacia hidrográfica do rio Catumbela, através da albufeira do Dungo, partindo-se do princípio que na época das chuvas não é transferida água.

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados do processamento realizado com recurso à extensão HEC-GeoHMS dos dados geométricos da bacia hidrográfica em estudo.

**Tabela 7 - Tabela resumo com as características da bacia hidrográfica**

<b>Bacia Hidrográfica do rio Cavaco</b>		
<b>Área A</b>	km <sup>2</sup>	3977.94
<b>Comprimento da linha de água principal L</b>	km	163.23
<b>Perímetro P</b>	km	568.09
<b>Altura Média <math>h_m</math></b>	m	734.90
<b>Declive Médio S</b>	m/m	0.01
<b>Comprimento total das linhas de água <math>\Lambda</math></b>	km	674.66
<b>Índice de Gravelius <math>K_c</math></b>		2.522



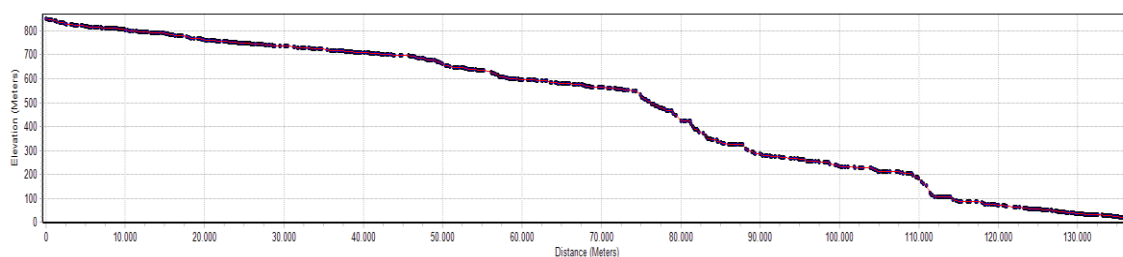
<b>Fator de forma <math>K_f</math></b>		0.149
<b>Retângulo Equivalente <math>L_e</math> <math>l_e</math></b>	km	269.272
		14.773
<b>Índice de alongamento</b>		18.227
<b>Densidade de Drenagem <math>\lambda</math></b>	km/km <sup>2</sup>	0.170
<b>Percurso médio <math>P_s</math></b>	km	1.474

Pelo índice de Gravelius, estando este afastado da unidade, que indicaria uma bacia circular, é possível concluir que a bacia hidrográfica em estudo é irregular. A tendência para cheias é menor nas bacias hidrográficas com maiores valores do índice de Gravelius (Lencastre & Franco, 2003). Por sua vez, também o fator de forma com o valor 0,15 indica que a bacia em estudo será pouco sujeita a cheia, uma vez que este valor é característico de bacias estreitas e longas, onde os cursos de água secundários afluem distribuídos ao longo do curso de água principal (Lencastre & Franco, 2003).

Com um índice de alongamento substancialmente superior a 2 é possível concluir que a bacia hidrográfica do rio Cavaco é alongada.

Relativamente à densidade de drenagem, e segundo Lencastre e Franco (2003), a bacia hidrográfica em estudo, com um valor perto de 0,5 km/km<sup>2</sup> é uma bacia mal drenada.

No gráfico da Figura 10 é possível observar o desenvolvimento da linha de água principal do rio Cavaco.



**Figura 10 – Perfil longitudinal do curso de água principal do Rio Cavaco**

O declive médio da linha de água principal é de 0,01 m/m e a altura média corresponde a 734,9 metros.

## 4.2. Caracterização climática

A região em estudo localiza-se no litoral oeste de Angola que em termos meteorológicos caracteriza-se por ter uma estação seca mais prolongada e precipitações irregulares (Serralheiro, Monteiro, & Sousa, 2009).

A duração da estação das chuvas na zona em estudo é em média de 6 meses (Novembro a Abril), com exceção das zonas com altitudes superiores, em que tende a começar logo em Outubro. Em Benguela verifica-se, em média, 42 dias do ano com precipitação e 71% de humidade relativa média anual do ar. Este último valor tem tendência a ser estável na zona litoral, contudo, ao avançar para o interior, é possível distinguir-se dois períodos distintos em que os valores são mais elevados na época das chuvas (Centro de Estudos de Pedologia Tropical, 1981).

No gráfico da Figura 11, obtido no *site* do INAMET, é possível observar que na cidade de Benguela, onde desagua o rio Cavaco, a precipitação significativa ocorre em cerca de 6 meses. Os extremos anuais de temperatura são de 15°C e 30°C. A temperatura média na cidade de Benguela é de 23,8°C sendo que a bacia hidrográfica em análise se encontra compreendida entre as isotermas anuais de 22°C, na zona montante do rio, e de 25°C.

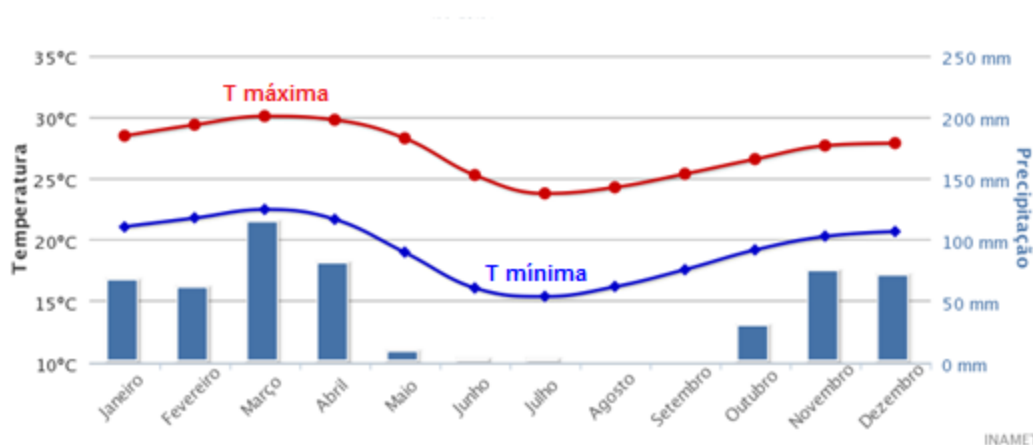


Figura 11 - Temperaturas mínimas, temperaturas máximas e precipitação média ao longo do ano. (INAMET, 2014)

A zona é caracterizada por um clima do tipo BW, segundo a classificação de Köppen. Já segundo a classificação de Thornthwaite, a bacia hidrográfica do rio Cavaco está praticamente toda compreendida na classificação de clima seco (Centro de Estudos de Pedologia Tropical, 1981).

No estudo encomendado pela DNA, a Sweco, em 2005, estimou para a bacia hidrográfica uma precipitação média de 751 milímetros, distribuída mensalmente como se observa no gráfico da Figura 12.



**Figura 12 - Distribuição mensal da precipitação na bacia hidrográfica segundo o estudo da Sweco em 2005. (SWECO, 2005)**

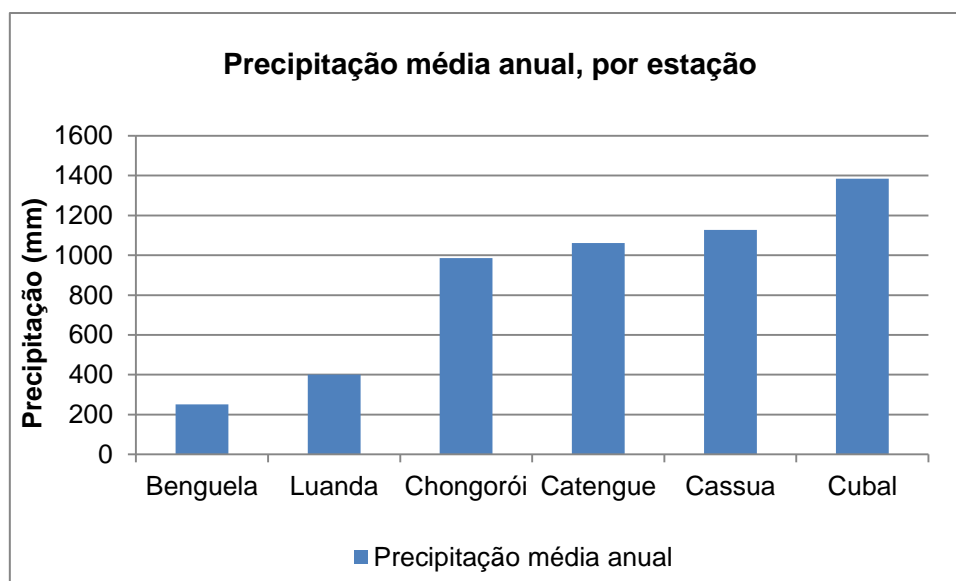
Na tabela 8 é possível analisar a precipitação máxima diária anual observada em cada estação no período em estudo.

**Tabela 8 - Análise estatística dos valores medidos de máximo diário anual para cada estação**

<b>Dados Estatísticos</b>	<b>Estação</b>					
	Luanda	Benguela	Cassua	Catengue	Chongorói	Cubal
<b>Valor mínimo (mm)</b>	17,2	9,2	41	38	32	47,7
<b>Mediana (mm)</b>	62,4	45,3	75,35	93,7	71,2	80
<b>Valor máximo (mm)</b>	151,1	150	112,2	199,2	148,5	180
<b>Média (mm)</b>	72,4	53,4	74,6	111,5	75,3	91,9
<b>Desvio-padrão (mm)</b>	39,6	35,7	21,2	47,9	27,7	35,1

Incluiu-se a estação de Luanda devido ao facto de se terem utilizado como base do trabalho as curvas IDF desenvolvidas para as suas características pluviométricas. Encontrando-se igualmente na zona costeira, observou-se que Benguela segue uma distribuição semelhante a Luanda, embora com valores médios e mínimos geralmente inferiores. Chongorói tem uma influência mínima em duas sub-bacias a montante devido à sua distância, tendo sido escolhida para o trabalho devido à continuidade dos seus dados. Por sua vez, Cassua, Catengue e Cubal estão localizadas perto das vertentes superiores da bacia, registando valores médios do máximo diário anual perto do dobro dos registados em Benguela. Contudo, como seria de esperar numa análise de valores extremos, o desvio-padrão é acentuado.

No que diz respeito à precipitação média anual (ver gráfico da Figura 13), calculada com os valores referentes ao período utilizado, verifica-se que a quantidade de água que chove nas cabeceiras durante um ano chega a ser cinco vezes superior, comparando com a zona jusante.



**Figura 13 - Precipitação média anual, calculada para o período em estudo**

### **4.3. Ocupação e uso do solo**

A maior parte da área da bacia hidrográfica encontra-se coberta por florestas, pastagens, e prados, como se pode constatar pela análise do mapa da Figura 14. Junto à foz existem zonas residenciais densas ao longo da margem do rio, na cidade de Benguela.

Na região sudeste da bacia verifica-se uma predominância de mosaicos Vegetação/Agricultura, ao passo que a jusante, na zona noroeste, dominam as pastagens abertas. As florestas e o mato fechado são encontrados sobretudo na zona intermediária da bacia e nos pontos de cabeceira.

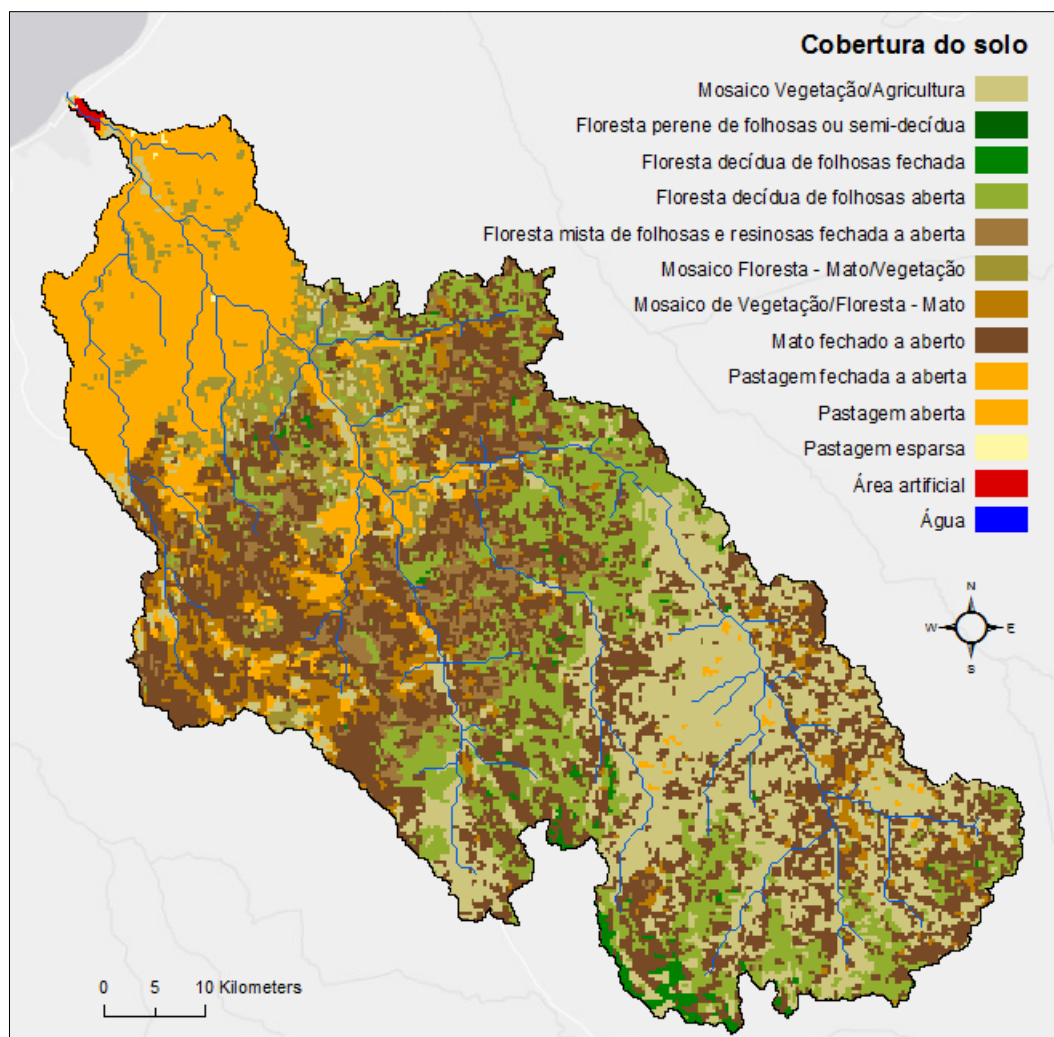
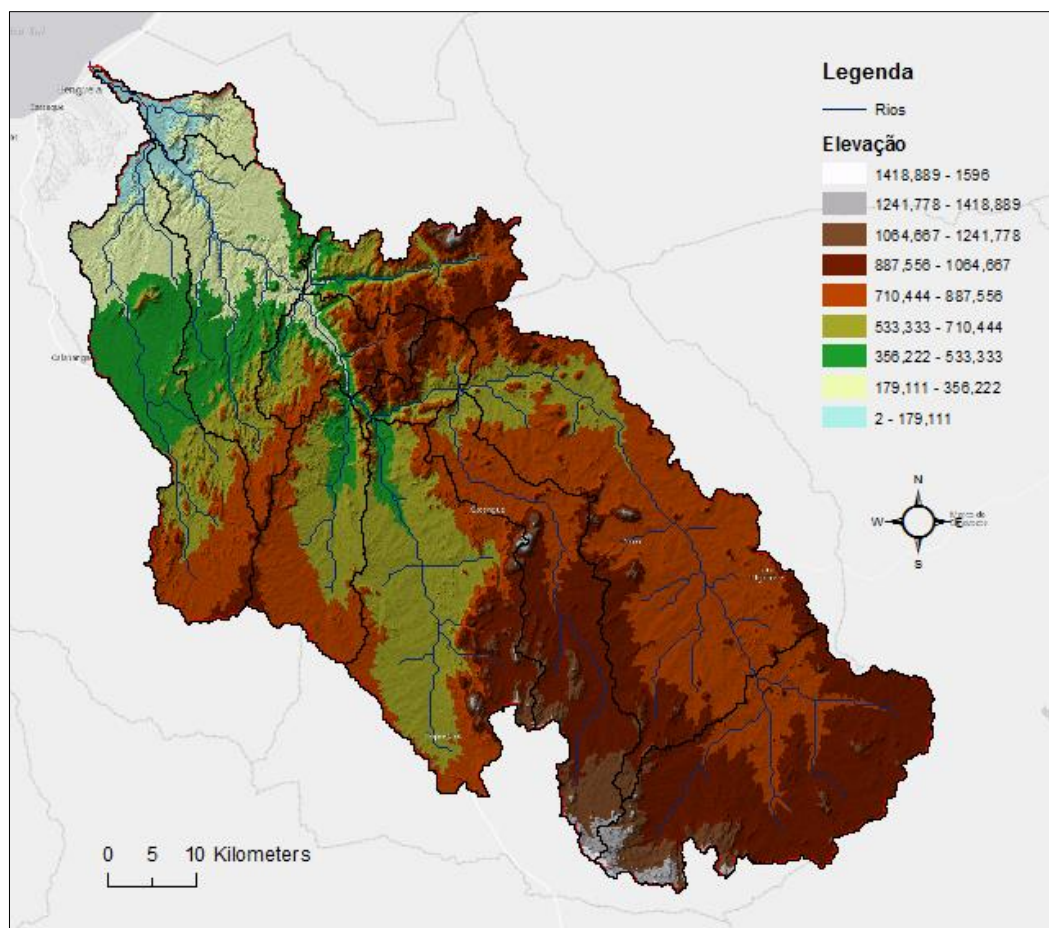


Figura 14 - Cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: Globcover (2009)

#### 4.4. Caracterização morfológica, geológica e litológica

O ponto mais alto da bacia hidrográfica localiza-se na zona montante do rio e tem um valor de 1596 metros. Já os pontos de menor cota localizam-se, como seria de esperar, na foz do rio Cavaco.

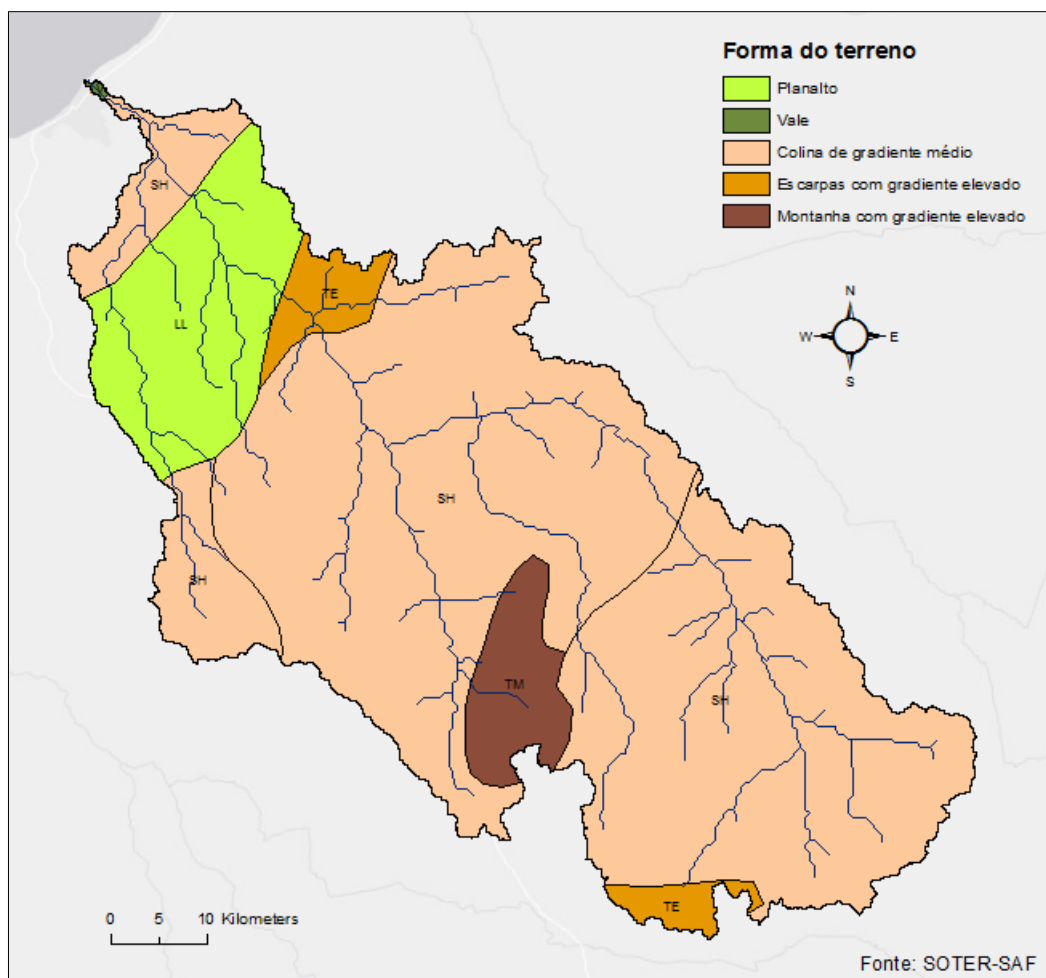
A zona a montante da bacia apresenta as cotas mais altas, sendo possível ainda distinguir valores mais altos na parte norte da bacia, comparativamente com a parte sudeste em que não existe tanta variação hipsométrica (Figura 15).



**Figura 15 - Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Cavaco obtida por análise do MDT**

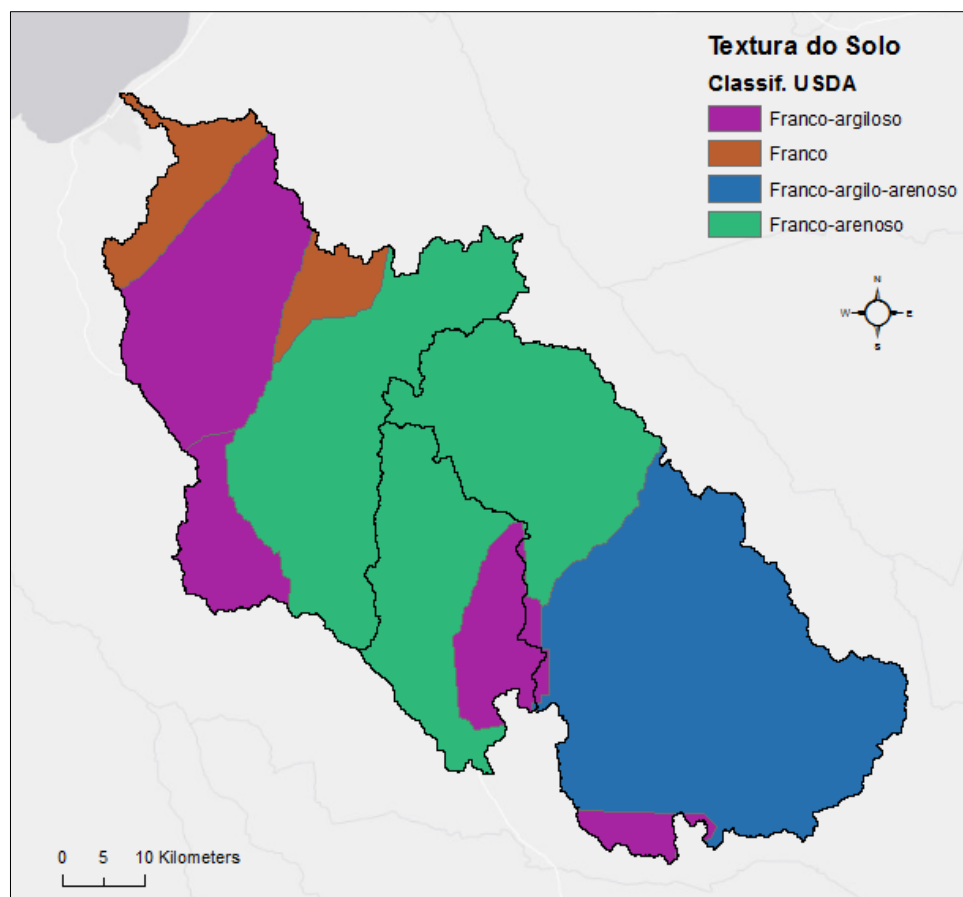
### Unidades morfo-estruturais

Em termos de unidades geomorfológicas, as nascentes do rio Cavaco localizam-se sobretudo na planície central de Angola, na chamada *Zona de Transição* e a sua foz na depressão litoral, ou orla litoral. Ao desenvolver-se o rio atravessa uma zona de relevo de denudação, onde a erosão é intensa (Centro de Estudos de Pedologia Tropical, 1981; Honrado *et al.*, 2011). Nas zonas a montante as vertentes apresentam declives acentuados (Figura 16).



**Figura 16 - Tipo de relevo na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: SOTER-SAF (2012)**

O Vale do Rio Cavaco, a jusante, tem uma planície com 5240 ha de solos maioritariamente aluviais e aluvio-coluviais (Serralheiro *et al.*, 2009). O seu traço terminal é uma planície aluvionar com largura média de 300 m e comprimento de 10 km. O rio na década de 60 desaguava imediatamente a norte da cidade de Benguela (Motta Marques, 1967), embora atualmente com o aumento populacional a cidade se tenha já desenvolvido para lá da margem norte do rio.



**Figura 17 – Classificação da textura dos solos dominantes na bacia hidrográfica do rio Cavaco.**  
**Fonte: SOTER-SAF (2012)**

Ao longo da costa existem sobretudo rochas sedimentares do Baixo e Médio Cretáceo e Terciário. Estas rochas não constituem geralmente bons aquíferos, mas podem existir camadas de arenitos e calcários com potencial superior. Na parte superior da bacia hidrográfica existem principalmente granitos e gnaisses do Pré-Cambriano (SWEÇO, 2005).

A bacia hidrográfica do rio Cavaco é dominada na zona montante e intermediária por granitos. As vertentes do Vale do Cavaco na zona terminal são constituídas por margas e argilas gipsíferas, calcários margosos em plaquetas e conglomerados gipsíferos. São formações marinhas e fluvio-continentais, que assentam sobre granitos, gnaisses e migmatitos (Figura 18). Toda a zona aplanada é constituída por aluviões, transportadas pelo rio Cavaco. São constituídas por diversos tipos de areia de diferentes calibres, por vezes com intercalações argilosas em lenticulas ou em bancadas. A sua espessura é de cerca de 50 milímetros. As areias aluvionares que ocorrem são, geralmente, aquíferas. Os sedimentos aluviais ao longo da parte inferior do Rio Cavaco poderão, desta forma, constituir um bom aquífero, possivelmente com capacidade para abastecer a cidade de Benguela, se houver escoamento subterrâneo na estação seca. Ao longo da parte inferior do rio, no entanto, o aluvião pode conter água salobra (SWEÇO, 2005).



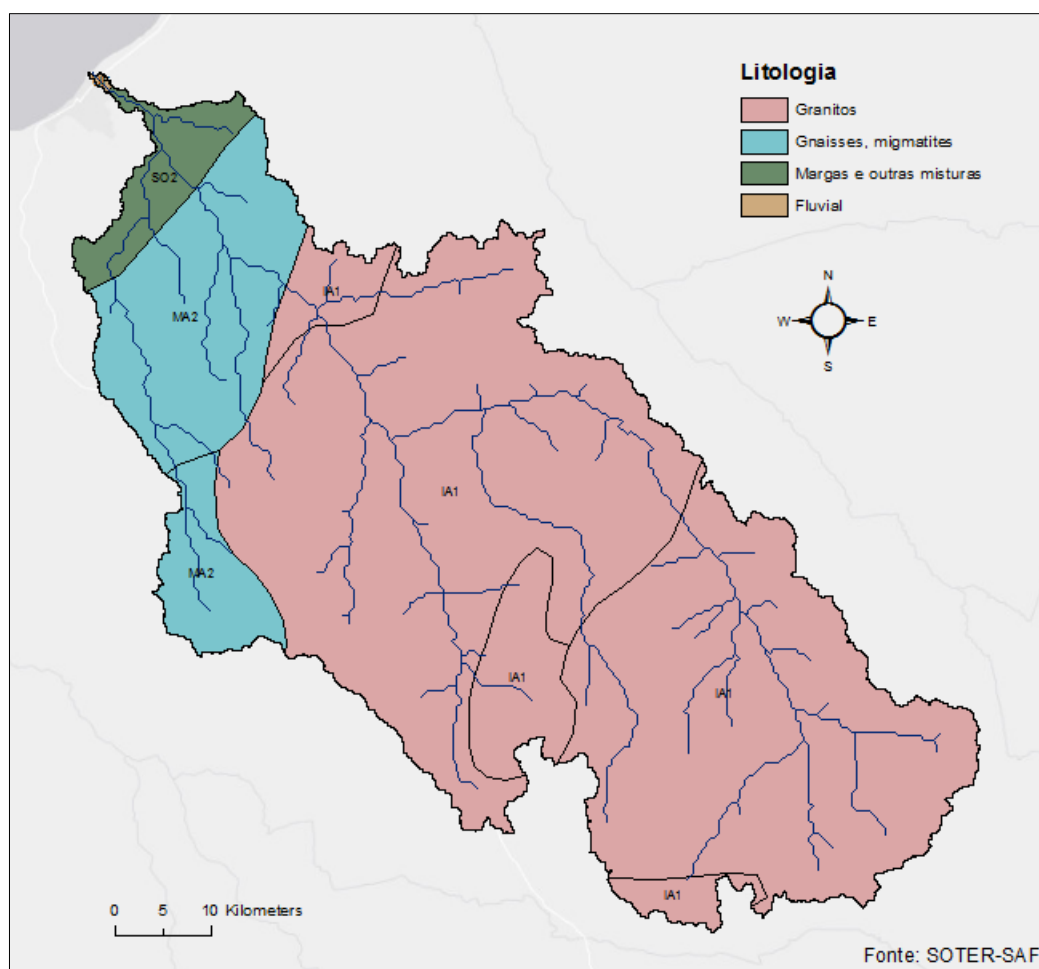


Figura 18 - Litologia na bacia hidrográfica do rio Cavaco. Fonte: SOTER-SAF (2012)

#### 4.5. Principais utilizações da água na bacia

O estudo da SWECO em 2005 analisou as características gerais das bacias hidrográficas do território angolano, em parceria com o MINEA. Na tabela 9 resumem-se as previsões de utilização da água e evolução populacional na bacia hidrográfica do rio Cavaco.

Tabela 9 – Previsão da evolução populacional na bacia hidrográfica do rio Cavaco e do consumo de água. Fonte (SWECO, 2005).

<b>Bacia hidrográfica do rio Cavaco</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2015</b>	<b>2025</b>
População	377.915	480.809	648.468	869.021
Consumo doméstico de água (m <sup>3</sup> /dia)	17.639	35.837	56.534	102.247
Pecuária e Avicultura (m <sup>3</sup> /dia)	7.580	8.884	12.218	16.833
Necessidades agricultura (m <sup>3</sup> /dia)	-	422.466	-	422.466
Captações de água estimadas - agricultura e pecuária (m <sup>3</sup> /dia)	430.046	431.350	434.684	439.299

Castanheira Diniz e Aguiar identificaram no vale do Cavaco 5 mil hectares de área em utilização. Grande parte estava, até 1974, aproveitada para a produção de banana (1000 ha) e de batata (1000 ha), mas também de cana sacarina, cebola e hortícolas verdes, entre outros (Soveral Dias, 1973).

Desta forma, a necessidade de água para o regadio existente ou que poderá existir na zona é alta e constante, tendo sido a exploração de furos e poços a solução encontrada para satisfazer as necessidades de água. As águas provenientes das cheias do rio Cavaco são a maior fonte de alimentação da bacia hidrogeológica associada à planície aluvionar e, assim, do manto freático em exploração, na altura do estudo levado a cabo pelo Engenheiro Motta Marques, dos Serviços de Geologia e Minas de Angola, em 1967. No mesmo estudo o autor concluiu que, pelo menos nos oito anos antecedentes o nível estático sofreu um rebaixamento de cerca de meio metro por ano. A salinidade alta do manto freático é consequência, numa primeira instância, do escoamento superficial sobre as margas e argilas gipsíferas. Com o desenvolvimento da rega intensiva, os sais contidos no solo são dissolvidos e transportados para o aquífero (Motta Marques, 1967). Desde então, a aptidão das águas subterrâneas para o regadio tem vindo a ficar cada vez mais comprometida.

### 4.6. Eventos extremos na bacia

A bacia hidrográfica do Rio Cavaco está exposta sobretudo a dois tipos de eventos extremos: cheias e secas.

Com o objetivo de colmatar os problemas agrícolas devidos à falta de água na bacia hidrográfica do rio Cavaco durante o cacimbo, vários meses em que o rio não tem escoamento superficial, já em 1886 foram feitos estudos sobre *a forma de derivar* o rio Cubal da Hanha, afluente do rio Catumbela, para o rio Halo, afluente do rio Cavaco, mas o projeto não chegou a avançar (Dias, 1938).

Após outros estudos que foram revistos, na década de 60 a Direção Provincial dos Serviços Hidráulicos avançou com o projeto. Foi dimensionada uma albufeira de regularização com  $57\text{hm}^3$  de capacidade, origem do transvaze, para assegurar um caudal a transferir de  $5\text{m}^3/\text{s}$ , em escoamento contínuo. O transporte da água foi garantido através da construção de um túnel de 4,58 km de comprimento, seguido de um canal com 1,18 km (Motta Marques, 1967).

Dias relata, apelidando de “grave perigo”, as grandes chuvas de 1917 que culminaram em grandes inundações, com água proveniente do sistema Rio Cavaco e Rio Catumbela (Dias, 1938).

De acordo com informação presente no trabalho de Tonecas (2012), com origem no gabinete técnico local para o desenvolvimento do vale do Cavaco, até 1983 a largura do rio não

ultrapassava os 60 metros. Neste momento, em determinadas secções atinge 200 metros de largura em consequência das cheias cíclicas que a bacia hidrográfica sofre.

Segundo o mesmo trabalho, as cheias de 2002 foram as mais severas, deixando para trás dois mortos, mais de 200 habitações destruídas, 35 hectares de plantações devastadas e um elevado número de desalojados. O nível de água atingiu o tabuleiro da ponte ferroviária, sendo que provocou mesmo o desabamento da ponte rodoviária. Esta foi substituída por uma ponte moderna e mais robusta em 2005, em destaque na fotografia da Figura 20.



**Figura 19 - A ponte rodoviária nova, construída na sequência da destruição da ponte antiga pelas cheias de 2002. Foto de RMCTeixeira, tirada a 30/09/2009. Fonte: Panoramio.**

O regime torrencial das cheias na bacia hidrográfica do rio Cavaco, ainda segundo o mesmo autor, causou a morte, em 2007, do encarregado de obras da construção da estação hidrométrica do Guvriri, no local da mesma. Ainda segundo o mesmo autor esta estação, nos registos que têm a partir de 2008, regista aumentos repentinos do nível de água, como por exemplo dos 3 metros a 7 metros num período de tempo de cerca de 24 horas (Tonecas, 2012). O rio Cavaco transporta uma grande quantidade de material sólido o que provoca o assoreamento do leito do rio a jusante, aumentando o risco de cheias e inundações na zona da cidade de Benguela (Tonecas, 2012). Os bairros mais vulneráveis estão identificados na imagem da Figura 20.



**Figura 20 - Identificação dos bairros de Benguela com maior vulnerabilidade ao risco de inundações. Fonte de informação: Tonecas (2012). Fonte do mapa: Google Maps (2014)**

A falta de planeamento e controlo leva a que não haja controlo da presença humana no leito do rio quando não se verifica escoamento, chegando-se mesmo a construir dentro do canal do rio (Dinis *et al.*, 2013). Na Figura 22 é possível observar-se a população a utilizar o leito do rio e na Figura 22 a fotografia tem uma perspetiva semelhante, mas com escoamento superficial e uma ponte já diferente.



**Figura 21 - Perspetiva da ponte para a foz do rio Cavaco. Foto de José Pires, tirada a 21/08/2007. Fonte: Panoramio**



A Figura 23 permite observar a mesma perspectiva passados três anos. De salientar a alteração da ponte à frente e da vegetação na margem direita do rio Cavaco.



**Figura 22 - A mesma perspectiva três anos depois. Foto de Fernando Baptista, tirada a 21/02/2010.**  
**Fonte: Picasa**

De acordo com informação no trabalho de Tonecas (2012), no Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros de Benguela o aviso prévio às populações é feito quando o rio Cavaco atinge um nível de água de 50 centímetros. As populações ameaçadas, para além dos bairros identificados na cidade de Benguela, são todas aquelas que se localizam nos vales ao longo das margens ao rio.



## 5. APLICAÇÃO DO MODELO À BACIA DO RIO CAVACO

### 5.1. Condicionantes gerais

O modelo físico da bacia foi importado do ArcGIS, discriminando desde logo todos os elementos e preenchendo os detalhes para cada um conforme o método escolhido (apresentados no capítulo da Metodologia).

No trabalho em ArcGIS optou-se pela divisão da bacia hidrográfica do rio Cavaco em 12 sub-bacias após teste do cenário de simulação apenas 3 sub-bacias. Desta forma é possível, logo à partida, discriminar com maior detalhe a informação da qual depende o modelo, como por exemplo, o número de escoamento. De facto, na zona central da bacia verifica-se números de escoamento inferiores que se refletem melhor numa maior divisão da bacia hidrográfica. Por outro lado, a definição de mais zonas de escoamento, canais principais e junções facilita a manipulação do modelo, por exemplo, na inserção de novos elementos como reservatórios.

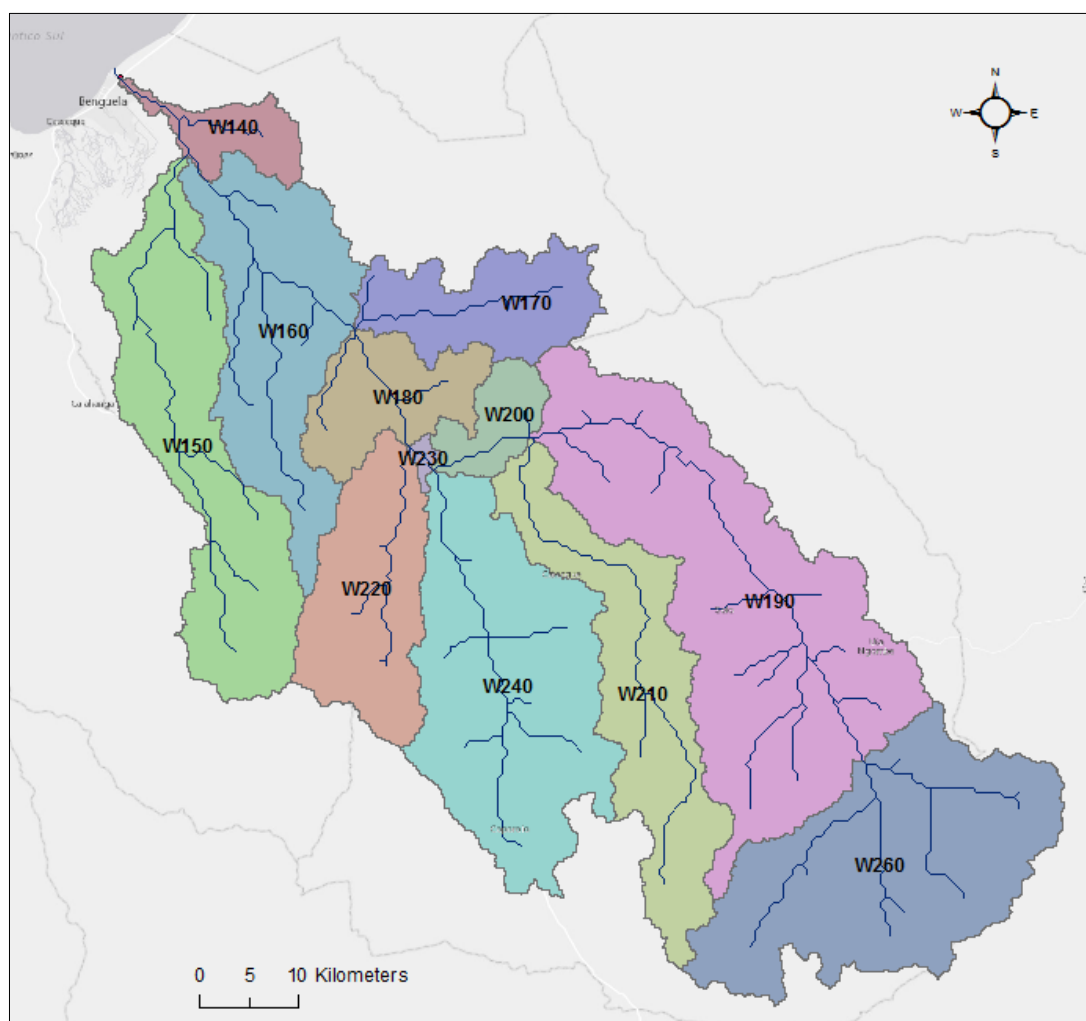






Figura 23 - Sub-bacias utilizadas na simulação hidrológica (ArcGIS)

Na Figura 24 encontra-se a apresentação da bacia hidrográfica do rio Cavaco no modelo HEC-HMS, com os seus elementos: sub-bacias , Troços , Junções  e o ponto de saída .

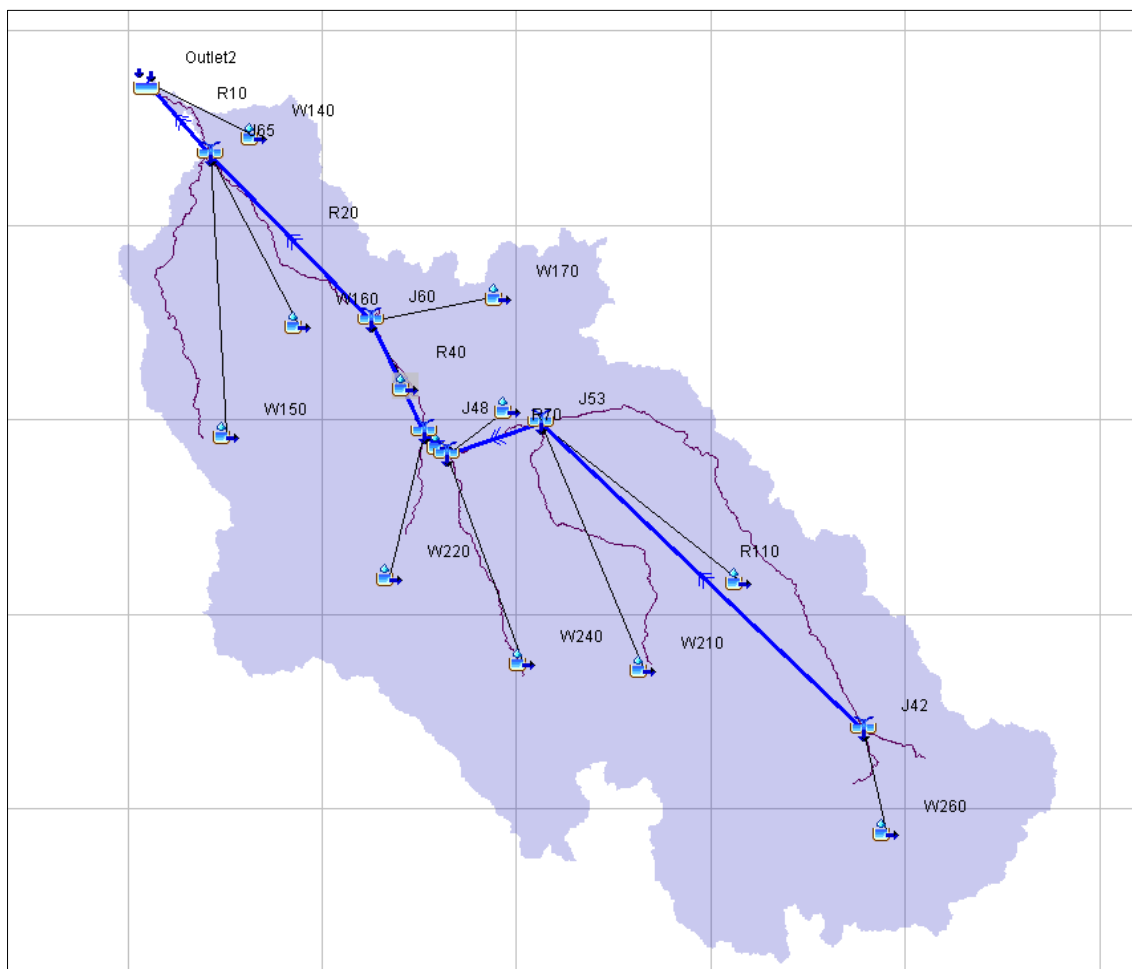


Figura 24 - Aspeto do modelo físico da bacia hidrográfica do rio Cavaco, no programa HEC-HMS

A informação geométrica que caracteriza as sub-bacias hidrográficas foi resumida em Excel e encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização das sub-bacias

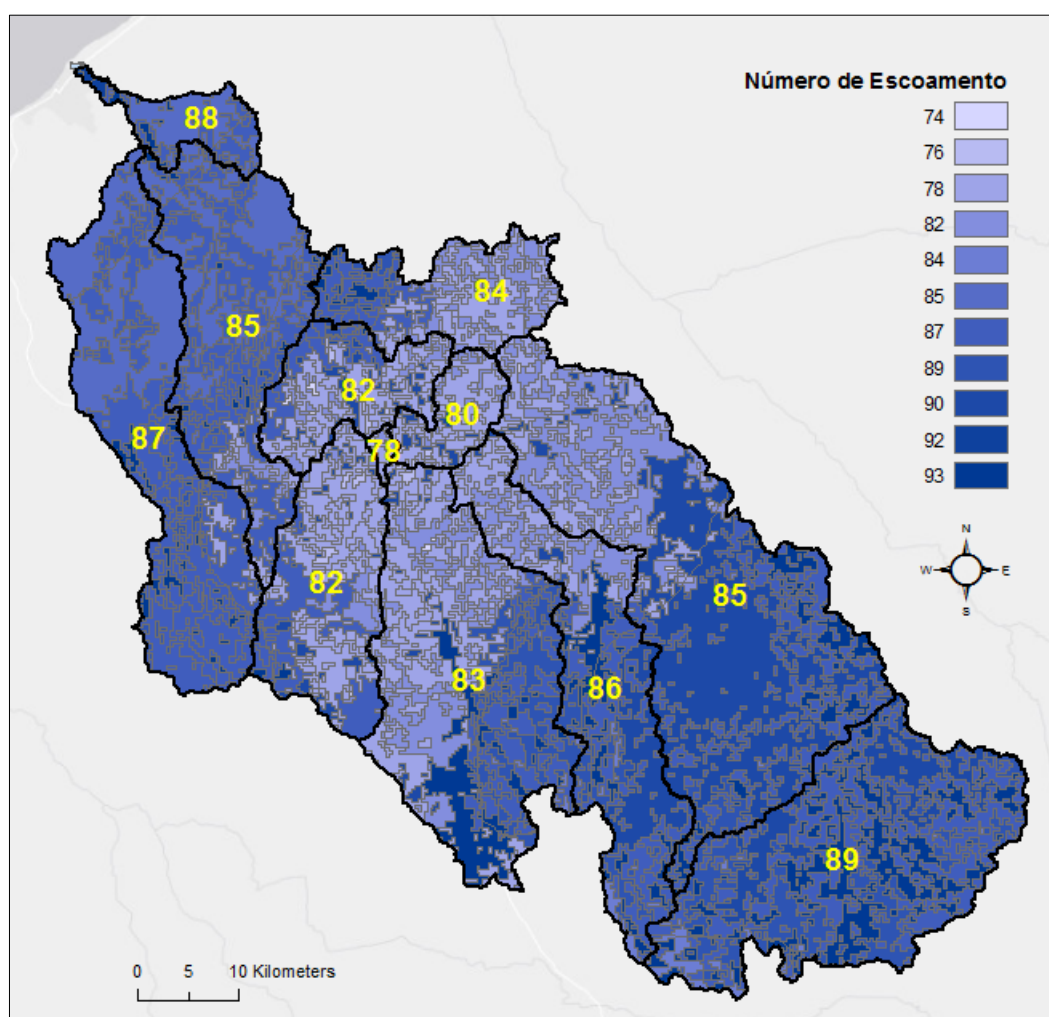
Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento linha água principal (km)	Perímetro (km)	Altura média (m)	Declive médio da linha de água principal (m/m)
W140	80,63	12,71	79,7	182,26	0,013
W150	467,13	60,17	192,6	474,33	0,037
W160	389,85	27,42	169,3	360,1	0,089
W170	192,88	24,11	120,2	535,2	0,053
W180	163,81	13,69	9,6	448	0,076
W190	809,33	58,26	240,8	257,63	0,016



<b>W200</b>	79,15	11,15	61	717,33	0,075
<b>W210</b>	382,23	60,34	202	395,32	0,019
<b>W220</b>	271,34	25,34	107,4	347,26	0,027
<b>W230</b>	8,84	3,6	20,2	336,05	0,088
<b>W240</b>	552,57	43,97	144,1	316,65	0,017
<b>W260</b>	579,18	25,83	179,6	155,73	0,015

O número de escoamento médio para toda a bacia hidrográfica do rio Cavaco é de 84. O tempo de concentração por sua vez é de **21,4 horas**, resultado da média entre o valor 19,9 calculado pela fórmula de Kirpich e 22,9 segundo a fórmula de Giandotti.

O número de escoamento foi obtido no ArcGIS através da reclassificação dos mapas de ocupação do solo e textura do solo, com os respetivos cálculos necessários. Obteve-se para condições antecedentes de humidade do solo AMC III a distribuição observável no mapa da Figura 25.



**Figura 25 - Distribuição dos números de escoamento na bacia hidrográfica do rio Cavaco e valores médios por sub-bacia utilizados na modelação hidrológica**

Tabela 11 - Número de escoamento e tempos de concentração para cada sub-bacia

<i>Sub-bacia</i>	<i>Nº de escoamento (AMC-III)</i>	<i>Tempo de concentração (h)</i>		
		<i>Kirpich</i>	<i>Giandotti</i>	<i>Média</i>
<b>W140</b>	88	2,5	5,1	3,8
<b>W150</b>	87	5,5	10,1	7,8
<b>W160</b>	85	2,1	7,9	5,0
<b>W170</b>	84	2,4	5,0	3,7
<b>W180</b>	82	1,3	4,2	2,8
<b>W190</b>	85	7,4	15,7	11,6
<b>W200</b>	80	1,2	2,4	1,8
<b>W210</b>	86	7,1	10,6	8,9
<b>W220</b>	82	3,2	7,0	5,1
<b>W230</b>	78	0,5	1,2	0,8
<b>W240</b>	83	5,8	11,2	8,5
<b>W260</b>	89	4,1	13,5	8,8

## 5.2. Cenários de simulação

Foram utilizados ao todo 9 cenários (Figura 27), trabalhando com 3 períodos de retorno, em regime natural, com o reservatório A e com o reservatório B. Para cada cenário simulou-se hidrogramas e valores de ponta de cheia para os períodos de retorno em estudo (5, 10 e 25 anos). O modelo meteorológico utilizado foi o mesmo para as diferentes simulações, assim como as condições de controle.

### Cenário 1

O cenário diz respeito à bacia hidrográfica em regime natural.

A nível das especificações de controle as simulações foram todas realizadas para um período de chuvada de 24 horas, com passo de 15 minutos. No modelo introduziu-se o *lag time* como *input* do método do SCS, calculado com base no tempo de concentração para cada sub-bacia.

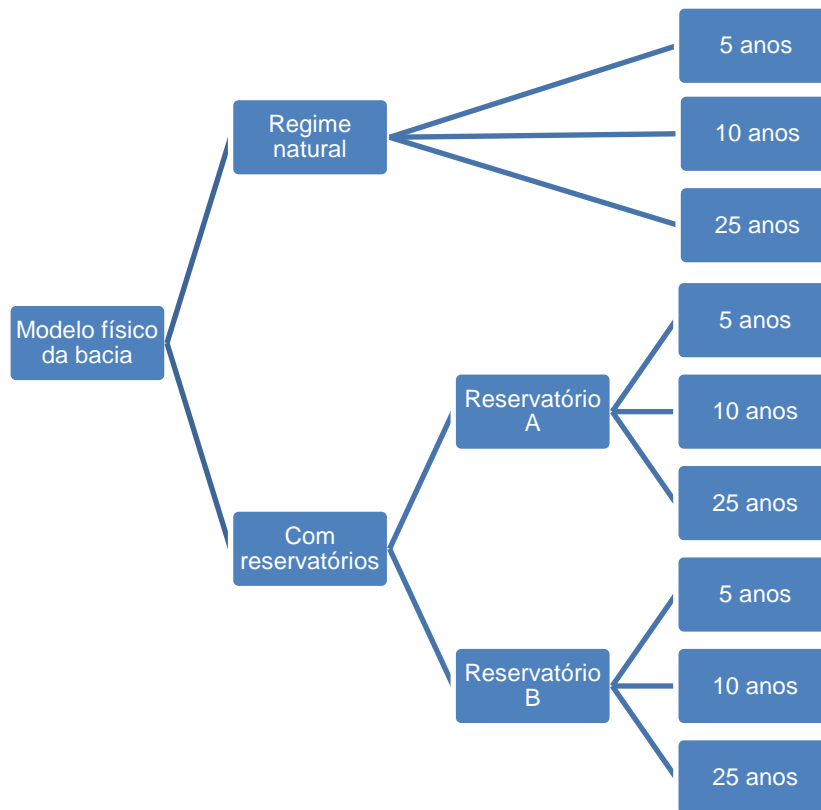


Figura 26 - Cenários de simulação

### Cenários com reservatórios

Os cenários de simulação 2 e 3 envolvem o teste de bacias de retenção com o objetivo de amortizar a onda de cheia. A inclusão destes cenários surgiu como resposta à seguinte questão: em que circunstâncias poderíamos construir um reservatório de forma a reduzir a cheia associada a um período de retorno de 25 anos para o valor associado a 5 anos? Os sistemas de drenagem de águas pluviais são, no geral, dimensionados para períodos de retorno que não ultrapassem os 5/10 anos. O sistema de drenagem da cidade de Benguela ficaria, desta forma, mais protegido relativamente à probabilidade de ocorrência das maiores ondas de cheia.

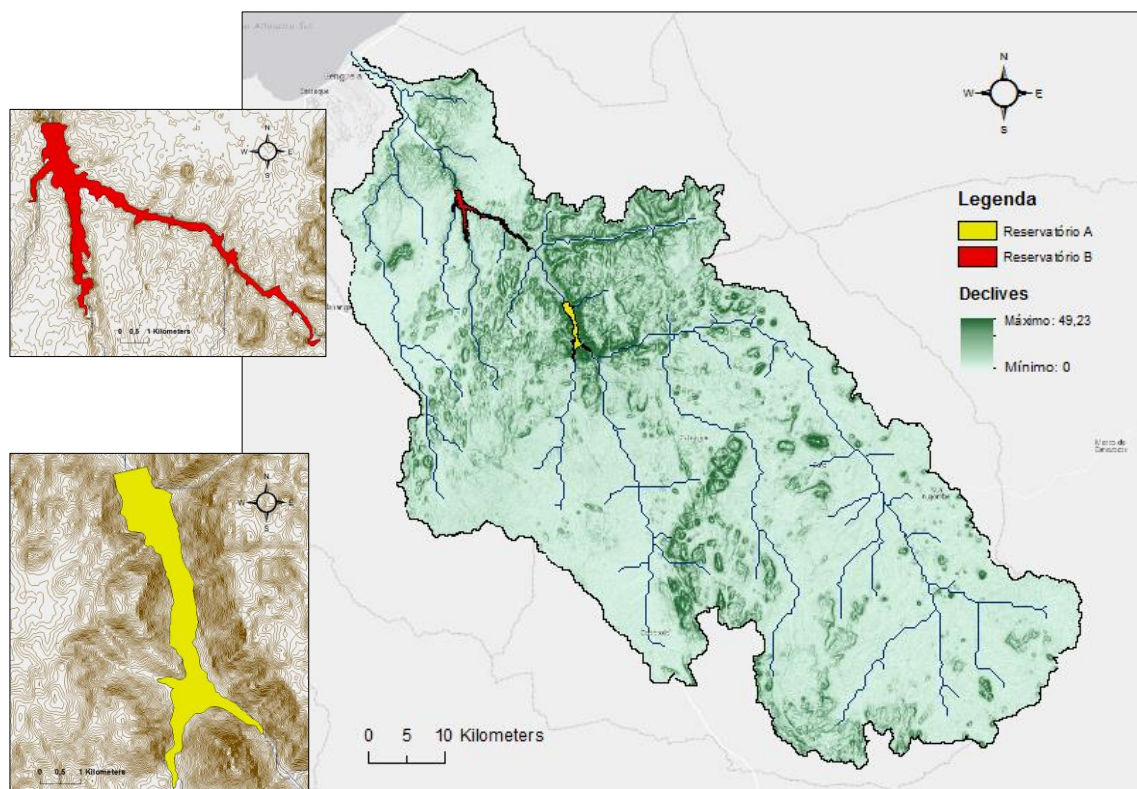
Este exercício representa mais uma forma de explorar o modelo HEC-HMS e a sua capacidade para auxiliar tomadas de decisão na mitigação de cheias. Os reservatórios modelados, de grande capacidade, podem ter vários aproveitamentos para além da defesa contra cheias. Por exemplo para a produção de energia hidroelétrica, para abastecimento de água às localidades e irrigação na época de estiagem.

Dada a escassez de água durante o cacimbo, faz todo o sentido que uma barragem a ser construída na bacia hidrográfica do rio Cavaco possa ser utilizada para fins múltiplos. Assim, não só permitiria o amortecimento da onda de cheia como fornece água para a irrigação e

distribuição às populações. A água afluente na época das chuvas pode assim ser armazenada para ser utilizada na época seca.

Na modelação feita não foram tidos em conta quaisquer critérios económicos nem as condições de fundação do terreno.

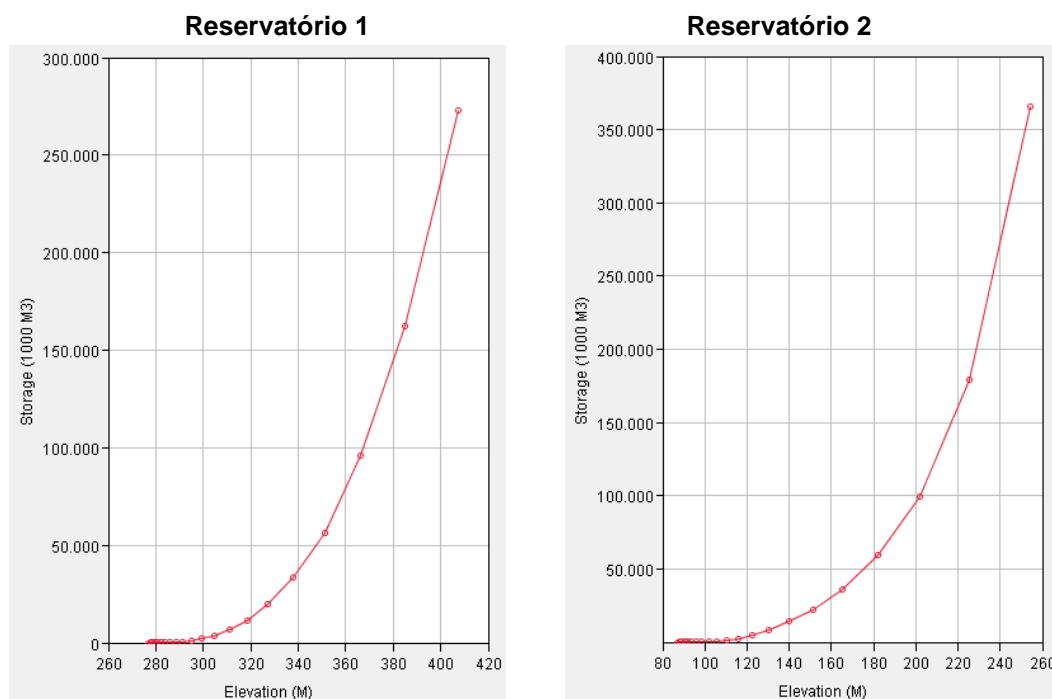
Embora neste trabalho tenham sido utilizados os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos, no dimensionamento deste tipo de estruturas devem ser utilizados períodos de retorno longos, que permitem um maior nível de confiança (100, 500 anos).



**Figura 27 - Localização hipotética dos reservatórios testados e declive da bacia**

Através da utilização da extensão HEC-GeoRAS para ArcGIS, ferramenta para análise hidráulica, foram obtidas as curvas características para cada um dos polígonos/reservatórios (gráficos da Figura 29).

O *routing* na simulação do reservatório foi feito com recurso às curvas que caracterizam a relação entre a elevação e o armazenamento (*Elevation-Storage function*). Estas funções foram obtidas através da utilização da ferramenta HEC-GeoRAS que facilita o cálculo do armazenamento em função da altura e da área, após construção do polígono correspondente ao reservatório.



**Figura 28 - Curvas de armazenamento-descarga para os reservatórios escolhidos**

Considerou-se como cenário inicial para ambos os reservatórios um armazenamento de 20% da capacidade total. Definiram-se hipoteticamente as estruturas para descarga no modelo HEC-HMS, um descarregador de fundo e um descarregador de cheias. No primeiro, o coeficiente utilizado foi 0.6 e no segundo 1.66, valores típicos neste tipo de dimensionamento. O coeficiente de descarga de fundo traduz a perda de energia que existe quando a água escoar através do orifício. Por sua vez, o coeficiente de descarga do descarregador de cheia tem em conta a perda de energia resultante da entrada, escoamento e saída da água pelo descarregador. Depende da forma do descarregador, mas normalmente o coeficiente encontra-se entre 1,10 e 1,66 no sistema internacional de unidades (Scharffenberg, 2013).

**Tabela 12 - Características gerais dos reservatórios utilizados na simulação hidrológica**

<b>Caraterísticas</b>	<b>Reservatório A</b>	<b>Reservatório B</b>
Cota máxima (m)	407,4	254,3
Capacidade máxima (1000 m <sup>3</sup> )	273296	365435
Área máxima (1000 m <sup>2</sup> )	5673	8496
Armazenamento inicial (1000 m <sup>3</sup> )	54659	73087
Cota mínima (m)	277	87
$\Delta$ Cota (m)	130,3	167,3
<b>Descarregador de fundo</b>		
Cota do centro (m)	277,5	88
Área (m <sup>2</sup> )	10	12
Coeficiente de descarga ( - )	0,6	0,6

<b>Descarregador de cheias</b>		
Cota (m)	380	220
Comprimento (m)	80	20
Coeficiente ( $m^{0,5}/s$ )	1,66	1,66

A Tabela 12 resume as características dos reservatórios utilizados nos cenários de simulação com a inserção de reservatórios na bacia hidrográfica do rio Cavaco.

### 5.3. Resultados

Seguidamente são apresentados os resultados da metodologia proposta pela seguinte ordem: aplicação da fórmula racional, resultados da modelação hidrológica realizada com recurso ao modelo HEC-HMS e utilizando os cenários de simulação apresentados e, por fim, exercício de simulação das alturas de água na estação do Guvriri.

A partir da construção das curvas IDF e respetivas curvas de possibilidade udométrica calculou-se a intensidade média de precipitação, ponderada através das precipitações de projeto das sub-bacias, para cada período de retorno. Desta forma foi possível aplicar a fórmula racional para ter uma noção genérica da ordem de valores a esperar.

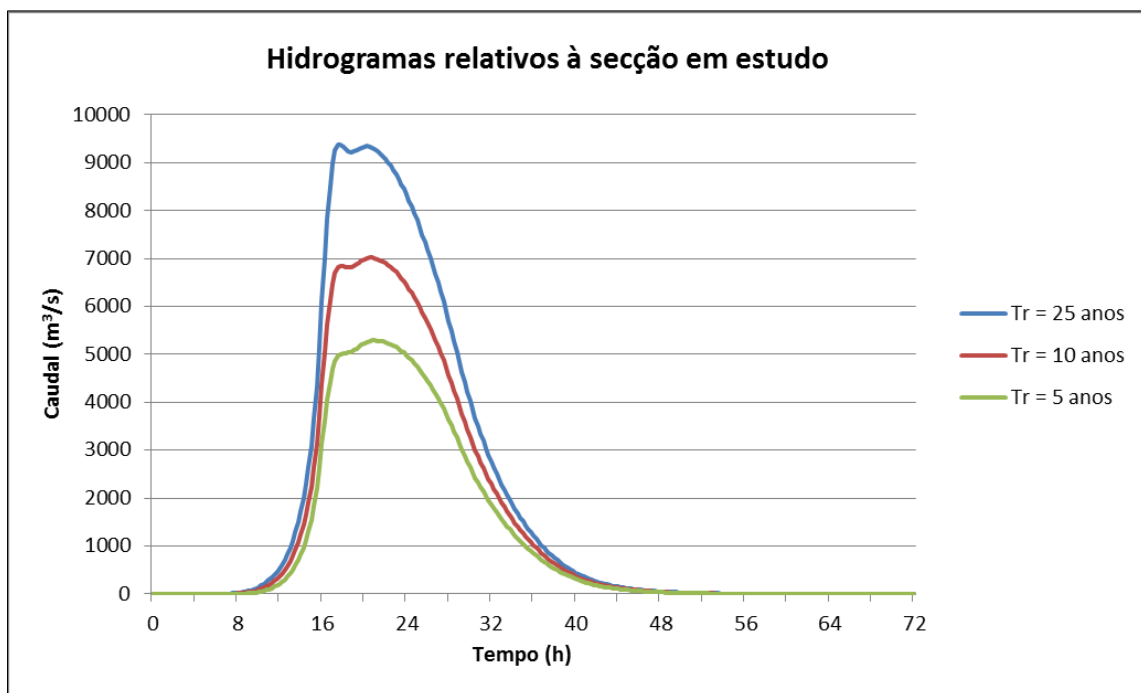
**Tabela 13 - Aplicação da fórmula racional**

<i>Sub-bacias</i>	<i>Período de retorno</i>		
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>
<b>W140</b>	81,63	102,14	129,88
<b>W150</b>	116,66	140,54	173,23
<b>W160</b>	107,12	130,07	161,42
<b>W170</b>	146,37	173,10	209,98
<b>W180</b>	150,67	177,80	215,29
<b>W190</b>	134,29	157,23	189,05
<b>W200</b>	150,67	177,80	215,29
<b>W210</b>	142,67	167,69	202,35
<b>W220</b>	150,67	177,80	215,29
<b>W230</b>	150,67	177,80	215,29
<b>W240</b>	150,67	177,80	215,29
<b>W260</b>	94,49	106,74	124,17
<b>Ponderação</b>	128,48	151,44	183,18
<b>Intensidade (m/s)</b>	1,49E-06	1,75E-06	2,12E-06
<b>c</b>		0,45	
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>		3977940000	
<b>cIA (m<sup>3</sup>/s)</b>	2661,93	3137,54	3795,2

Aplicando a fórmula racional para estimação direta do caudal de ponta de cheia  $Q_p$ , obteve-se os valores presentes na Tabela 13. Para o coeficiente  $c$  da fórmula racional, após consulta da tabela correspondente a áreas agrícolas, utilizou-se o valor 0,45, respeitante a culturas em tipos de solos franco ou similares, com capacidade de infiltração média.

Por sua vez, os resultados das simulações realizadas no modelo hidrológico HEC-HMS encontram-se resumidos na tabela 14 com comparação dos valores dos diferentes caudais de ponta na secção de referência para cada período de retorno e cenário de simulação. A simulação foi feita para eventos de precipitação com duração de 24 horas, simultânea em toda a área da bacia hidrográfica, isto é, em todas as sub-bacias.

Na Figura 29 encontram-se os hidrogramas resultantes da simulação do escoamento na foz do rio Cavaco, resultante da modelação das precipitações de projeto associadas a períodos de retorno de 5, 10 e 25 anos.



**Figura 29 - Hidrogramas relativos ao escoamento na secção de referência, resultante da simulação em regime natural para um tempo de chuvada intensa de 24 horas, simultânea em toda a bacia**

Os hidrogramas para os diferentes períodos de tempo apresentam o mesmo comportamento, encontrando-se a diferença no valor do pico de cheia. Os períodos de retorno maiores, devido aos à precipitação mais intensa associada, resultam em volumes de cheia mais elevados.

É possível analisar os valores de caudal associados aos diferentes picos de cheia na Tabela 14.

**Tabela 14 - Valores dos caudais de ponta de cheia na secção de referência, para as diferentes simulações, e percentagem de reduções com os reservatórios, face ao regime natural**

		Caudais de ponta de cheia (m <sup>3</sup> /s)		
<i>Probabilidade</i>	<i>Período de retorno</i>	<b>Regime natural</b>	<b>Reservatório A</b>	<b>Reservatório B</b>
20%	5 anos	5287,9	3433,0 -35,1%	2154,9 -59,3%
10%	10 anos	7021,6	4646,1 -33,8%	3343,0 -52,3%
4%	25 anos	9382,3	6381,0 -31,9%	4254,9 -54,7%

Dados os parâmetros admitidos e o período de retorno de 25 anos, o caudal máximo descarregado foi de 6372,9 m<sup>3</sup>/s no reservatório A e de 4256,5 m<sup>3</sup>/s, no reservatório B. A descarga realizada por qualquer um dos reservatórios condiciona o valor máximo de caudal na secção de referência.

Com a introdução de um reservatório é possível a redução do pico da onda de cheia para valores próximos do valor correspondente ao período de retorno de 5 anos, em regime natural. Desta forma, uma rede de drenagem pluvial na cidade de Benguela, se dimensionada para 5, anos seria abrangida por uma garantia mais elevada.

A diferença ente os valores calculados pelo método racional e os valores resultantes do modelo são substanciais. Vários autores têm defendido que o método racional aplica-se apenas a pequenas e médias bacias. Esta condicionante pode estar na base da disparidade de valores calculados através do método racional e a modelação no programa HEC-HMS.

Para além da disparidade dos resultados da Fórmula Racional e do modelo, os índices de caracterização geométrica da bacia indicam, numa primeira análise, que a bacia hidrográfica do rio Cavaco não é propícia à ocorrência de cheias. A reduzida densidade de drenagem calculada na bacia hidrográfica do rio Cavaco de 0,17 km/km<sup>2</sup> indicaria igualmente que o rio não seria propício a cheias.

Contudo, os afluentes ao longo da linha de água principal do rio Cavaco têm origem zonas de drenagem cujo relevo é bastante acentuado, o que pode promover o carácter torrencial do rio.

Conforme concluído em Tonecas (2012), quando a precipitação é intensa na região montante da bacia é comum observar-se variações substanciais no nível da água num curto período de tempo. No trabalho em questão comparou-se a bacia hidrográfica do rio Cavaco com a bacia do rio Catumbela, imediatamente a norte, onde a precipitação é mais intensa, mas os registos



de altura de água são inferiores. Como tal, a precipitação só por si também não é suficiente para justificar o regime torrencial do rio Cavaco. O autor conclui que o motivo centra-se na conjugação das características da precipitação com as do relevo.

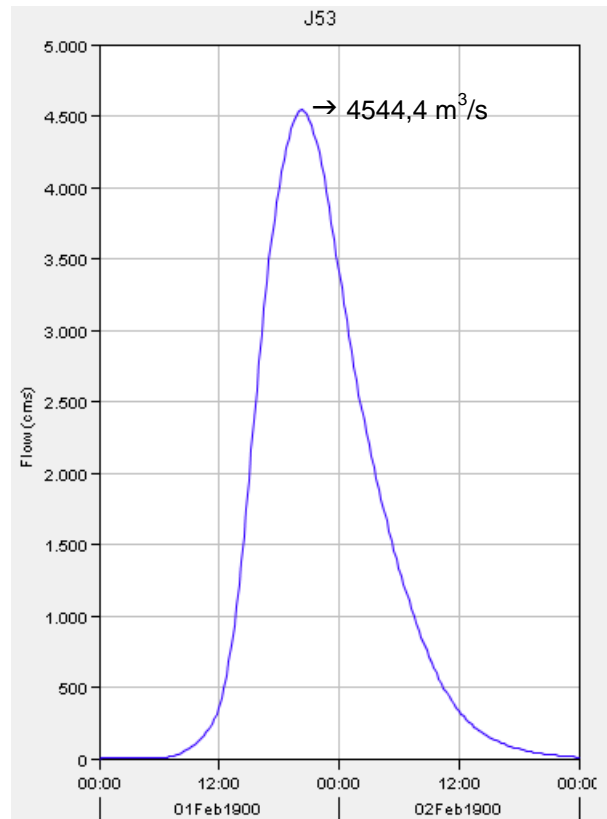
A bacia do rio Catumbela apresenta os valores elevados de precipitação em zonas intermédias da bacia de drenagem, enquanto a do Cavaco verifica os máximos de precipitação nas zonas de cabeceira da bacia hidrográfica. Como tal, os declives acentuados destas áreas propiciam o aumento de velocidade do escoamento que, ao atingir os vales rochosos, aumenta significativamente a altura de água correspondente (Tonecas, 2012). O resultado do exercício da Figura 21 confirma as conclusões uma vez que o caudal referente ao pico da onda de cheia nessa mesma secção em regime natural corresponde ao intervalo de valores presentes em Tonecas (2012) como alturas máximas.

Outra das limitações encontradas na aplicação desta metodologia concerne a distribuição da precipitação. Numa bacia hidrográfica com área perto dos 4000 km<sup>2</sup>, a probabilidade de chover simultaneamente em toda a sua extensão é reduzida. Como tal, assume-se aqui a pior hipótese isto é, o cenário mais crítico.

### **Cálculo da altura de água na secção da estação de Guvriri**

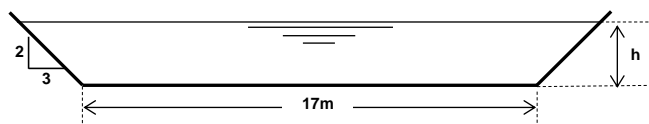
Este exercício teve como objetivo a análise comparativa das alturas de água associadas aos caudais resultantes da modelação realizada com as alturas de água máximas referidas no trabalho Tonecas (2012) para a mesma secção (5-7 metros), associadas a chuvadas de 24 horas.

A Figura 31 apresenta o hidrograma resultante do escoamento associado à precipitação de projeto para o período de retorno de 25 anos na junção imediatamente a montante da estação do Guvriri, cuja localização exata encontra-se assinalada em Tonecas (2012). Analisando o MDT foi possível concluir que a localização assinalada diz respeito ao troço imediatamente a seguir à junção J53 do modelo elaborado no programa HEC-HMS.



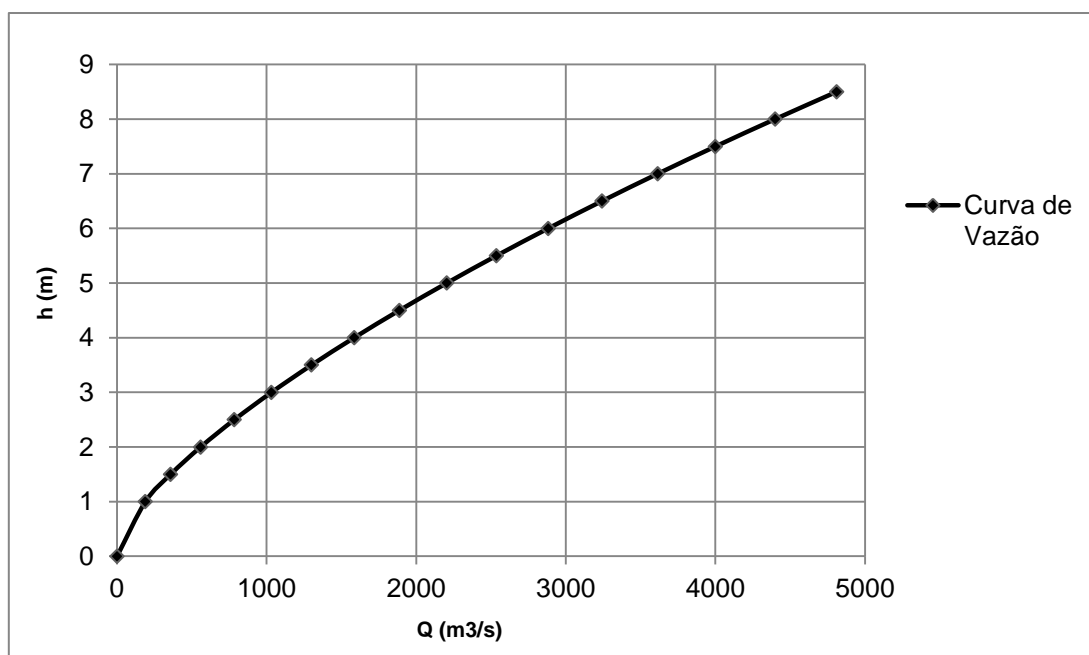
**Figura 31 - Escoamento resultante na junção imediatamente a montante da secção onde se localiza a estação de Guvriri para um período de retorno de 25 anos**

Na Figura 32 está representada a secção aproximada da estação de Guvriri utilizada neste exercício. A largura da secção, 17 metros, encontra-se referida em Tonecas (2012), sendo que o declive lateral foi selecionado após análise das fotografias presentes no mesmo trabalho.



**Figura 32 - Características aproximadas da secção transversal do rio Cavaco na estação de Guvriri**

Admitindo um coeficiente de rugosidade de 45 correspondente a zonas agrícolas e um declive de fundo na secção em análise de 0,075 (analisado no MDT) obteve-se as alturas de água observáveis na curva de vazão da Figura 33.



**Figura 30 – Curva de vazão resultante na secção transversal do rio Cavaco na estação de Guvriri associada ao período de retorno de 25 anos**

As Figuras 31 e 33 permitem verificar que o caudal respeitante ao pico de cheia resultante da modelação corresponde a alturas de água na ordem dos 8 metros. Este valor está próximo dos valores habituais associados a períodos de chuva intensa de 24 horas, medidos na estação do Guvriri (Dinis *et al.*, 2013; Tonecas, 2012).

Uma vez que não foi possível ter acesso a dados hidrométricos, este exercício foi a forma encontrada para, de certa forma, estabelecer uma relação entre os resultados do modelo e dados reais de campo referentes ao fenómeno de cheia na bacia hidrográfica do rio Cavaco.



## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Contributos e limitações do estudo

A modelação hidrológica tem provado ser uma ferramenta especialmente útil na elaboração de planos de proteção e minimização do risco de cheias. O trabalho realizado permitiu caraterizar de forma geral o regime de cheias na bacia hidrográfica do rio Cavaco, em Benguela. Por outro lado, a modelação hidráulica, componente que complementa a modelação hidrológica no estudo de cheias, não foi elaborada devido à pouca resolução do MDT. A análise dos hidrogramas de cheia a par do estudo hidráulico local permitiria observar as alturas de água e, consequentemente, a elaboração de mapas de inundação. Ainda assim, o resultado deste trabalho é relevante enquanto contributo para o conhecimento do risco de cheia, sendo que o modelo pode ser facilmente adaptado para uma análise com maior pormenor no futuro.

Com a realização deste trabalho foi possível verificar a necessidade de ter em conta todos os fatores que podem influenciar o regime de cheias de uma bacia hidrográfica. Isto é, a precipitação só por si, dependendo dos casos, pode não indicar diretamente a propensão do rio para o regime torrencial. As caraterísticas orográficas e morfo-estruturais da bacia hidrográfica do rio Cavaco parecem condicionar especialmente o carácter do escoamento superficial.

É de realçar o impacto da introdução dos reservatórios que, podendo ser dimensionados para múltiplos fins, teriam um impacto positivo na bacia hidrográfica do rio Cavaco, não só a nível do controlo de cheias, como para outros fins. As possíveis soluções para as secas recorrentes na região durante o período do cacimbo devem ser analisadas a par do fenómeno de cheias.

Assim, a construção de reservatórios ou bacias de retenção é uma das possíveis soluções para controlar o carácter torrencial das cheias na bacia hidrográfica do rio Cavaco, atenuando a onda de cheia. O desassoreamento periódico do rio na zona junto à cidade de Benguela poderá justificar-se, dado o facto de o regime torrencial ter tendência a um transporte de sedimentos elevado. É relevante ainda a construção e manutenção dos diques de proteção nas margens e o controlo das atividades e construções antrópicas nas zonas de risco. As medidas de mitigação dos danos provocados pelas cheias variam em cada caso específico, sendo de certeza necessário o envolvimento de toda a comunidade no processo.

De forma a possibilitar no futuro a diminuição do risco de cheia, a bacia hidrográfica necessita de um investimento no desenvolvimento e operacionalidade da rede hidrométrica. Esta deve ser dimensionada de forma a ser resistente ao regime torrencial de cheias na bacia hidrográfica do rio Cavaco durante a época das chuvas. Esta monitorização deve envolver a formação local de técnicos, através do trabalho conjunto com os órgãos competentes a nível nacional.

A inexistência ou inacessibilidade de alguns dados, fundamentais para a análise das condições topográficas e meteorológicas e a falta de séries contínuas de dados e do registo histórico de cheias que permitam a calibração correta do modelo limitaram o resultado deste trabalho. Seria importante a comparação do hidrograma de cheia sintético com os hidrogramas observados de forma a validar a modelação. Por fim, neste tipo de modelação, pode ainda suceder que o período de tempo utilizado não inclua os eventos de precipitação com maior intensidade, que originaram as maiores cheias para cada período de retorno. O ideal é trabalhar com o maior conjunto de dados contínuos possível que diga respeito, de preferência, a um período de tempo superior a 30 anos. Com a entrada em funcionamento das estações hidrométricas e a disponibilização de dados meteorológicos e hidrométricos mais atualizados será possível realizar estudos com maior rigor.

No que diz respeito à metodologia de trabalho proposta envolvendo o programa HEC-HMS, no tipo de modelo meteorológico selecionado verificou-se a falta de opção nas probabilidades selecionáveis para períodos de retorno de 2.5, 7.5 e 15 anos. Embora sejam probabilidades normalmente não utilizadas, em casos excecionais seria útil mais flexibilidade de forma a poder adaptar o trabalho à informação de que o utilizador dispõe (curvas IDF de Luanda).

É de realçar a importância das organizações e projetos internacionais que trabalham e compilam informação gratuita indispensável a este tipo de estudo, uma vez que a maioria da informação utilizada neste trabalho utilizou fontes desse tipo.

## **6.2. Trabalhos futuros**

Futuramente será necessário avaliar e quantificar, com o maior rigor possível, a vulnerabilidade socioeconómica do território e delimitar as áreas com diferentes riscos de inundação, de forma a permitir a intervenção com planos de ordenamento adequados.

De modo a antecipar os efeitos que as alterações climáticas poderão exercer no regime hidrológico da bacia hidrográfica do rio Cavaco, será benéfico o acompanhamento constante do processo de modelação climática, integrando os diferentes conceitos, ações e antecipando os desafios de forma proactiva.

A construção de um MDT local com maior detalhe, juntamente com informação mais pormenorizada sobre o uso, tipo e ocupação do solo permitiria obter resultados mais consistentes. Na impossibilidade de informação com maior qualidade, o lançamento mundial anunciado para 2015 do MDT do projeto STRM com a resolução de 1 arco-segundo (cerca de 30 metros) para o resto do planeta permitirá alcançar resultados com maior rigor.

Sendo Angola um país em grande desenvolvimento económico-social atualmente, tem a hipótese de trabalhar com a vasta informação já existente e construir as suas infraestruturas da forma mais eficiente e resiliente possível.

É necessário um planeamento hidrológico local estruturado que promova a diminuição do risco quer de cheias, quer de secas, sendo urgente o desenvolvimento e implementação dos sistemas de monitorização que suportem planos de alerta rápido às populações. O estudo pormenorizado de soluções integradas envolvendo, por exemplo, o desassoreamento do leito do rio, o controlo antrópico do leito através da construção de bacias de retenção e a ordenação territorial adequada das zonas em risco, permitirá a diminuição do risco associado às cheias na bacia hidrográfica do rio Cavaco.





## Referências bibliográficas

- Azevedo, A. L. (1952). *Curvas de Frequência das Quedas Pluviais de Grande Intensidade em Luanda*. Junta de Investigações do Ultramar - Estudos de Pedologia Tropical, Luanda, Angola.
- Balica, S. F. Popescu, I., Beevers, L., Wright, N. G. (2013). Parametric and Physically based Modelling Techniques for Flood Risk and Vulnerability Assessment: A Comparison. *Environmental Modelling & Software*, 41, 84–92.
- Bjoru, A. E. (2004). *Quality check - Historical Hydrological Data in Angola*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo, Noruega.
- Borges, L., Calengo, A., Galan, B., Coelho, A. (2001). Guião para a Integração da Perspectiva de Género na Legislação relativa a Tera e Águas em Angola, Cabo Verde e Moçambique. *FAO Legal Papers Online*, No. 88. Retrieved from [www.fao.org/legal/prs-ol](http://www.fao.org/legal/prs-ol)
- Cain, A. (2014). *Alterações Climáticas e Assentamentos Costeiros. Development Workshop Angola*. Luanda, Angola.
- Centro de Estudos de Pedologia Tropical. (1981). *Carta Geral dos Solos de Angola. 6 - Distrito de Benguela*. Memórias da Junta de Investigações do Ultramar. Lisboa, Portugal.
- Deltares. (2010). Deltares - Profile. Delft, Holanda. Retrieved September 04, 2014, from <http://www.deltares.com/en>
- DHI. (2014). MIKE by DHI - Water Resources. Retrieved September 04, 2014, from <http://www.mikebydhi.com/areas-of-application/water-resources>
- Dias, A. A. (1938). Benguela. In *Cadernos Coloniais N.º 43* (pp. 3–59). Lisboa, Portugal: Editorial Cosmos.
- Dinis, P. A., Mantas, V., Andrade, P. S., Tonecas, J., Kapula, E., Pereira, A., Carvalho, F. S. (2013). Contribution of TRMM rainfall data to the study of natural systems and risk assessment. Cases of application in SW Angola. *Estudos Do Quaternário*, 9, 33–43.
- Diretiva 2007/60/CE. (2007). Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. *Jornal Oficial Da União Europeia*, L 288/27.
- FAO. (2014). Aquastat. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- FAO/ESA. (2009). Land cover of Angola - Globcover Regional. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. (2012). *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Roma, Itália e IISA, Laxemburgo, Áustria.
- Farr, T., Kobrick. (2000). Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data. *Eos*, 81 No 48, 583–585.
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual*. Washington, DC, EUA.

- Ford, D., Pingel, N., DeVries, J. J. (2008). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Washington, DC, USA.
- He, Y., Pappenberger, F., Manful, D., Cloke, H., Bates, P., Wetterhall, F., Parkes, B. (2013). Flood Inundation Dynamics and Socioeconomic Vulnerability under Environmental Change. In *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources* (pp. 241–255). Elsevier Inc., Academic Press. Retrieved from [http://he.nmpi.net/documents/C508\\_9780123847034.pdf](http://he.nmpi.net/documents/C508_9780123847034.pdf)
- Hénonin, J., Russo, B., Roqueta, D. S., Sanchez-, R., Donna, N., Domingo, S., Mark, O. (2010). Urban Flood Real-Time Forecasting and Modelling: a State-of-the-Art Review. In *MIKE by DHI Conference* (pp. 6–8). Copenhagen, Dinamarca: DHI.
- Hipólito, J. R., Vaz, Á. C. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos* (1ª edição.). Lisboa, Portugal: IST Press.
- Honrado, J., Martins, F., Calejo, M. J., Santos, H. K., David, J. M. (2011). Plano Nacional Director de Irrigação de Angola. Uma síntese dos estudos. In *A Engenharia dos Aproveitamentos Hidroagrícolas: actualidade e desafios futuros. Jornadas Técnicas APRH*.
- INAMET. (2014). Climatologia para Benguela. *Normais Climatológicas*. Retrieved August 16, 2014, from <http://www.inamet.gov.ao/>
- Jensen, N. E., Thyme, J. B., Nielsen, B. M. (2008). Real-time SMS Warnings on Expected Basement Flooding Based on Now-casting using High-resolution X-band Radar Data. In *ERAD 2008 - Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. Helsínquia, Finlândia: DWD e DLR.
- Jonkman, S. N., Vrijling, J. K. (2008). Loss of Life due to Floods. *Journal of Flood Risk Management*, 1, 43–56. Retrieved from [http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over\\_de\\_faculteit/Afdelingen/Afdeling\\_Waterbouwkunde/Hydraulic\\_Engineering/Research\\_Groups/Hydraulic\\_Structures\\_and\\_Flood\\_Risk/Members/Jonkman\\_RB/doc/jfrm6.pdf](http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Waterbouwkunde/Hydraulic_Engineering/Research_Groups/Hydraulic_Structures_and_Flood_Risk/Members/Jonkman_RB/doc/jfrm6.pdf)
- Leavesley, G. H., Markstrom, S. L., Viger, R. J. (2006). USGS Modelur Modeling System (MMS) - Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS). In Taylor & Francis (Ed.), *Watershed Models* (1.ª edição.). Boca Raton, FL, EUA: CRC Press.
- Lencastre, A. (1996). *Hidráulica Geral* (3.ª edição.). Caparica: Fundação Armando Lencastre.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2003). *Lições de Hidrologia* (3.ª edição.). Caparica: Fundação Armando Lencastre.
- Mark, O., Russo, B., Renee, J.-R., Hénonin, J. (2014). *Potencial and short-comings of state-of-the-art real time urban flood forecast systems for two city types, including real time data assimilation and probabilistic uncertainty estimates*. Retrieved from <http://www.corfu7.eu/media/universityofexeter/research/microsites/corfu/1publicdocs/publicresults/D2.7.pdf>
- McSweeney, C., New, M., Lizcano, G. (2014). *UNDP Climate Change Country Profiles: Angola*. Oxford, Reino Unido. Retrieved from <http://country-profiles.geog.ox.ac.uk>
- Mens, M., Klijn, F., Bruijn, K. M., Beek, E. van. (2011). The Meaning of System Robustness for Flood Risk Management. *Environmental Science & Policy*, 14, 1121–1131.

- Motta Marques, J. M. (1967). Contribuição para o Estudo da Hidrogeologia do Vale do Rio Cavaco. *Boletim Dos Serviços de Geologia E Minas*, 16, 5–10.
- Natural Resources Conservation Service. (2007). *National Engineering Handbook Chapter 7 Hydrologic Soil Groups*. Washington, DC, USA.
- Newell, B., Wasson, R. (2001). Social System vs Solar System: Why Policy Makers Need History. In S. Castelein & A. Otte (Eds.), *Conflict and Cooperation Related to International Water Resources: Historical Perspectives* (pp. 3–17). Bergen, Noruega: UNESCO.
- OKACOM. (2010). *Protocolo da OKACOM Sobre a Partilha de Dados Hidrológicos para a Bacia do Rio Okavango*. Comissão Permanente da Água da Bacia do Rio Okavango, Botswana.
- Oliveira, R. (2008). *Caracterização Geomorfológica de uma Bacia Hidrográfica. Material de apoio de Hidrologia e Recursos Hídricos*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Pereira, A. (2009). *A Governação da Água em Angola: Riscos e Oportunidades*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Petterson, L.-E. (2004). *National Strategy Plan for Rehabilitation of the Hydrometric Network in Angola*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo, Noruega.
- Portela, M. M. (2005). *Modelação Hidrológica. Documento de apoio*. DECivil, SHRHA, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Quintino, M. (2011). *Recursos Hídricos em Angola*. Luanda, Angola.
- Quintino, M. (2013). Bacias Hidrográficas da República de Angola. In 1.<sup>a</sup> *Conferência Internacional sobre Energia e Águas*. Luanda, Angola: ACEEW.
- Roosbroeck, P. Van, Bettencourt, J. de, Huongo, A. (2006). *Actualização do Perfil Ambiental de Angola*. Bruxelas, Bélgica. Retrieved from [http://ec.europa.eu/development/icenter/repository/angola\\_CEP\\_2006.pdf](http://ec.europa.eu/development/icenter/repository/angola_CEP_2006.pdf)
- SADC. (2013). Integrating SADC HYCOS into Regional Disaster Risk Reduction and Flood Risk Management Strategies. *Procurement Notice: call for expression of interest*. Retrieved August 20, 2014, from <http://www.sadc.int/opportunities/procurement/procurement-archive/procurement-notice-call/>
- Scharffenberg, W. (2013). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA, EUA.
- Serralheiro, R. P., Monteiro, F. G., Sousa, P. L. de. (2009). O Regadio em Angola na perspectiva do Desenvolvimento Rural. In *Economia, Sociologia e Desenvolvimento Rural - Actas do 1.º Encontro Luso-Angolano da Universidade de Évora* (pp. 65–69). Évora: Universidade de Évora.
- Serviço Meteorológico de Angola. (1947-1968). *Anuário Elementos Meteorológicos e Climatológicos*. Luanda, Angola: Imprensa Nacional.
- Soveral Dias, J. (1973). *Parecer “Acerca do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Cavaco”* (p. 11). Nova Lisboa (atual Huambo), Angola.
- SWECO. (2005). *A Rapid Water Resources and Water Use Assessment for Angola - Final Report*. Luanda, Angola.

- Tonecas, J. (2012). *Inundações nas Bacias Hidrográficas dos Rios Catumbela e Cavaco - Angola*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Yuan, Y., Qaiser, K. (2011). *Floodplain Modeling in the Kansas River Basin Using Hydrologic Engineering Center (HEC) Models. Impacts of Urbanization and Wetlands for Mitigation*. U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Las Vegas, NV, EUA.
- Ziegler, A. D., She, L. H., Tantasarin, C., Jachowski, N. R., Wasson, R. (2012). Floods, false hope, and the future. *Hydrological Processes*. Retrieved October 11, 2014, from <http://courses.nus.edu.sg/course/geoadz/internet/publications/Ziegler>

### **Sites consultados:**

<http://www.emdat.be/> - The International Disaster Database

<http://www.wmo.int/> - World Meteorological Organization

<http://eur-lex.europa.eu/> - Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações

<http://www.inamet.gov.ao/> - Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica

<http://www.undp.org> - Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas

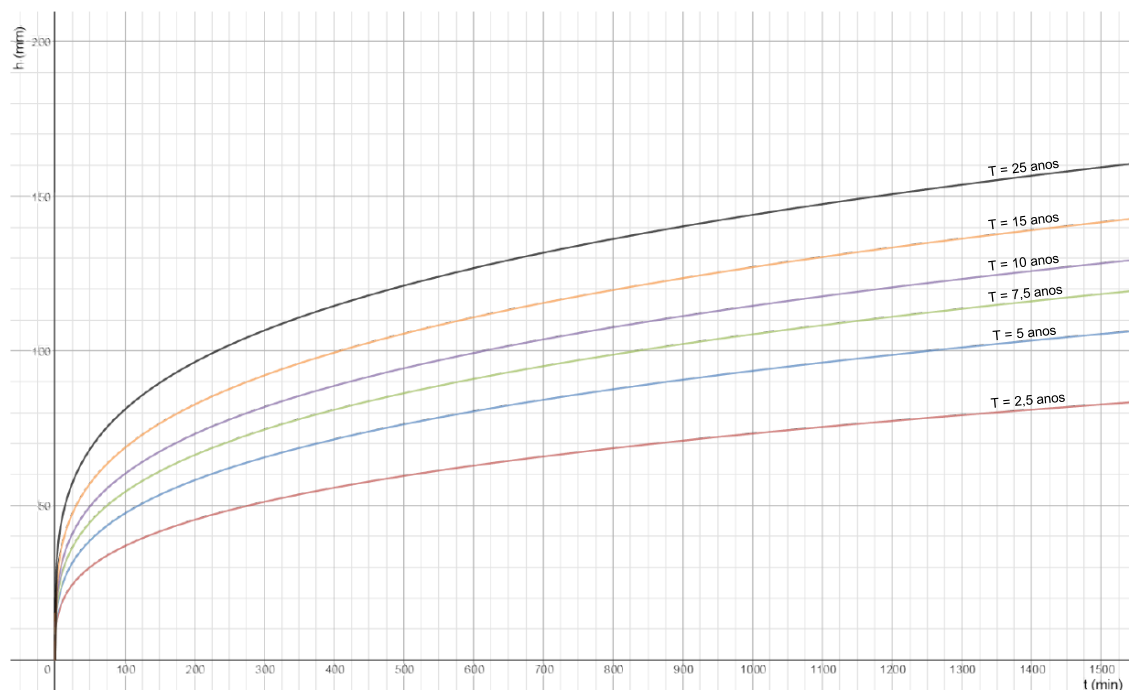
<http://preview.grid.unep.ch/> - Plataforma Global de Informação sobre Risco *PREVIEW*

<http://www.panoramio.com/>

<http://www.jpl.nasa.gov/srtm>

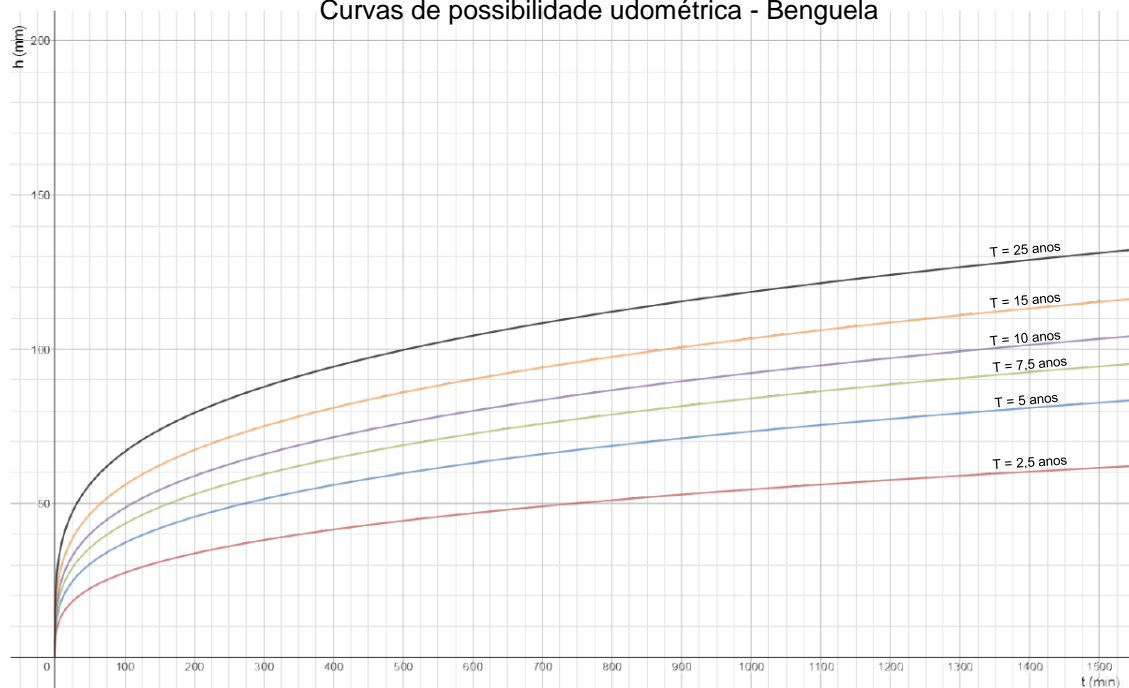
## Anexo I – Curvas de possibilidade udométrica para cada estação

Curvas de possibilidade udométrica - Luanda (Azevedo, 1952)

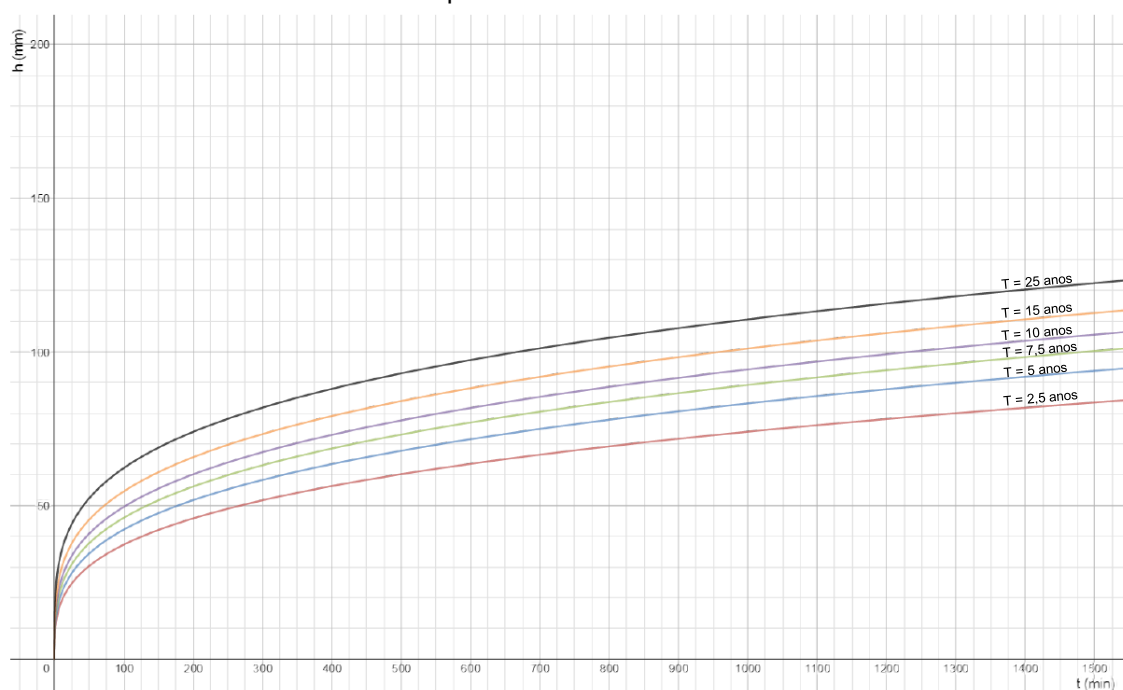


### Curvas construídas e utilizadas no âmbito desta tese de mestrado

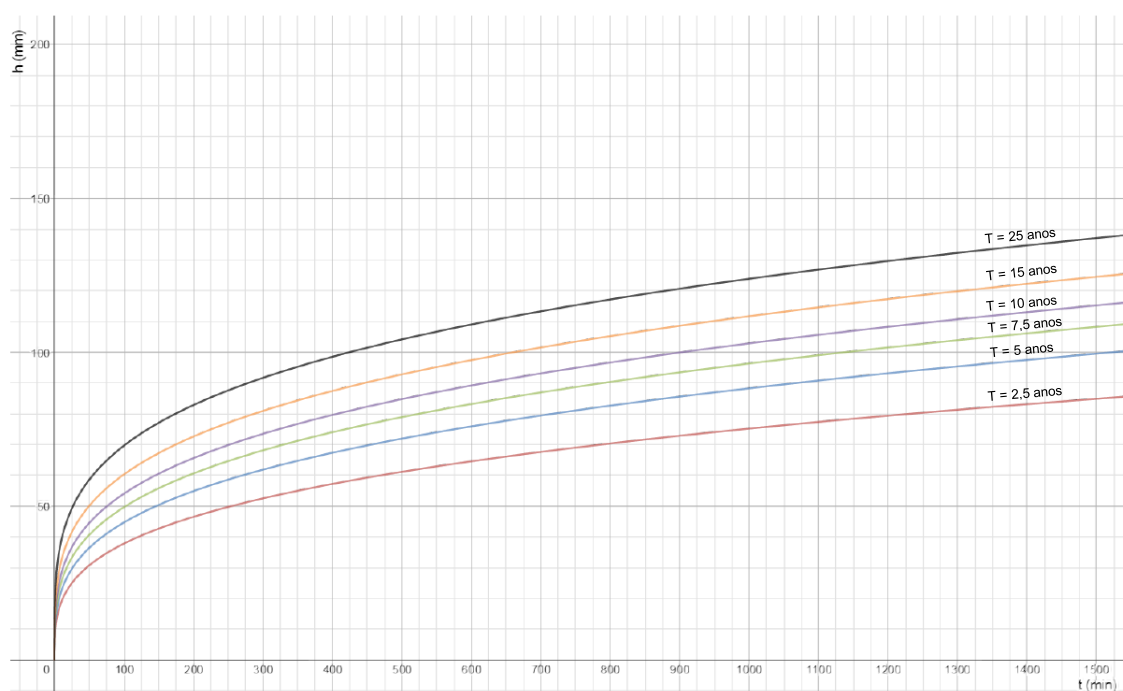
Curvas de possibilidade udométrica - Benguela



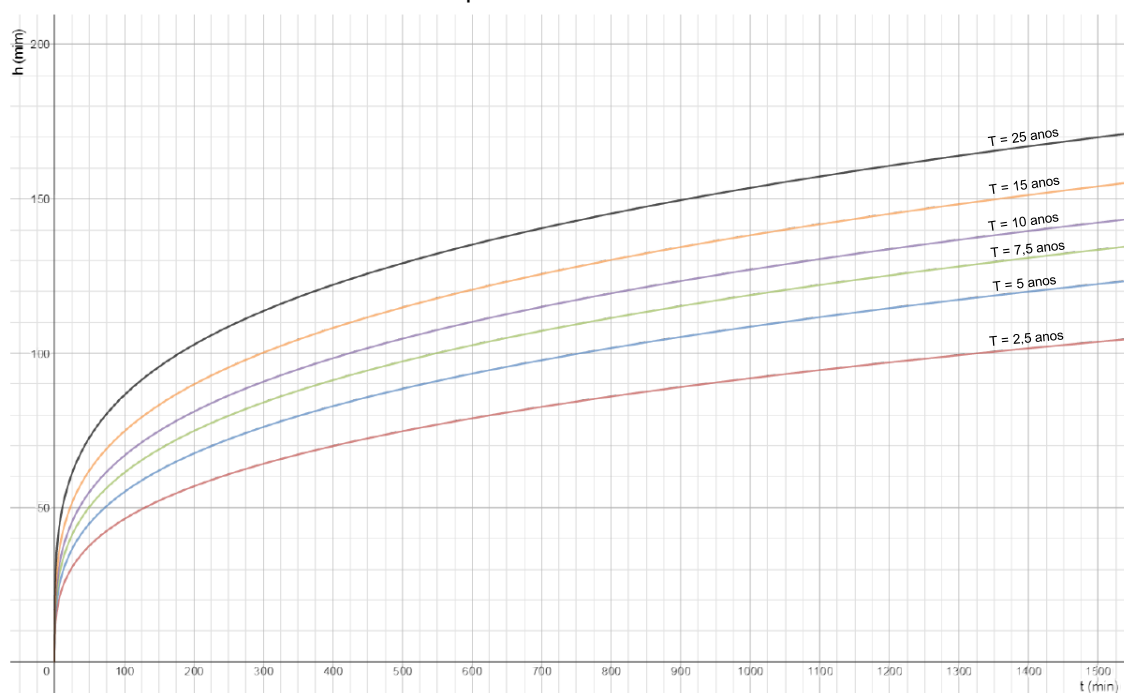
Curvas de possibilidade udométrica - Cassua



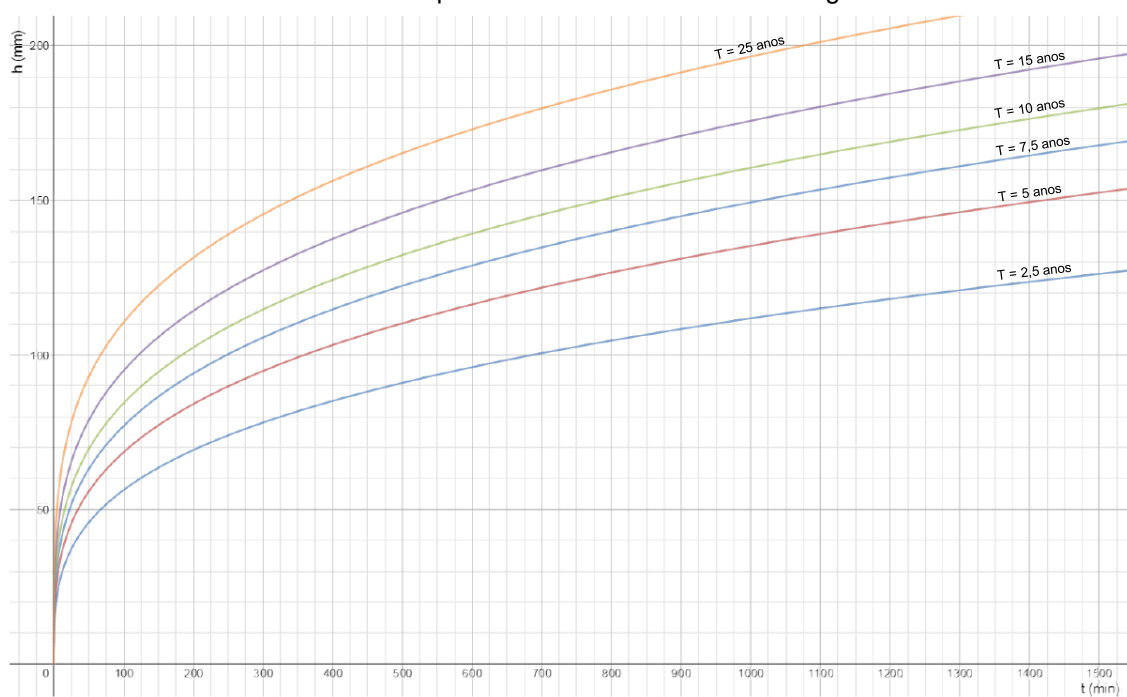
Curvas de possibilidade udométrica - Chongorói



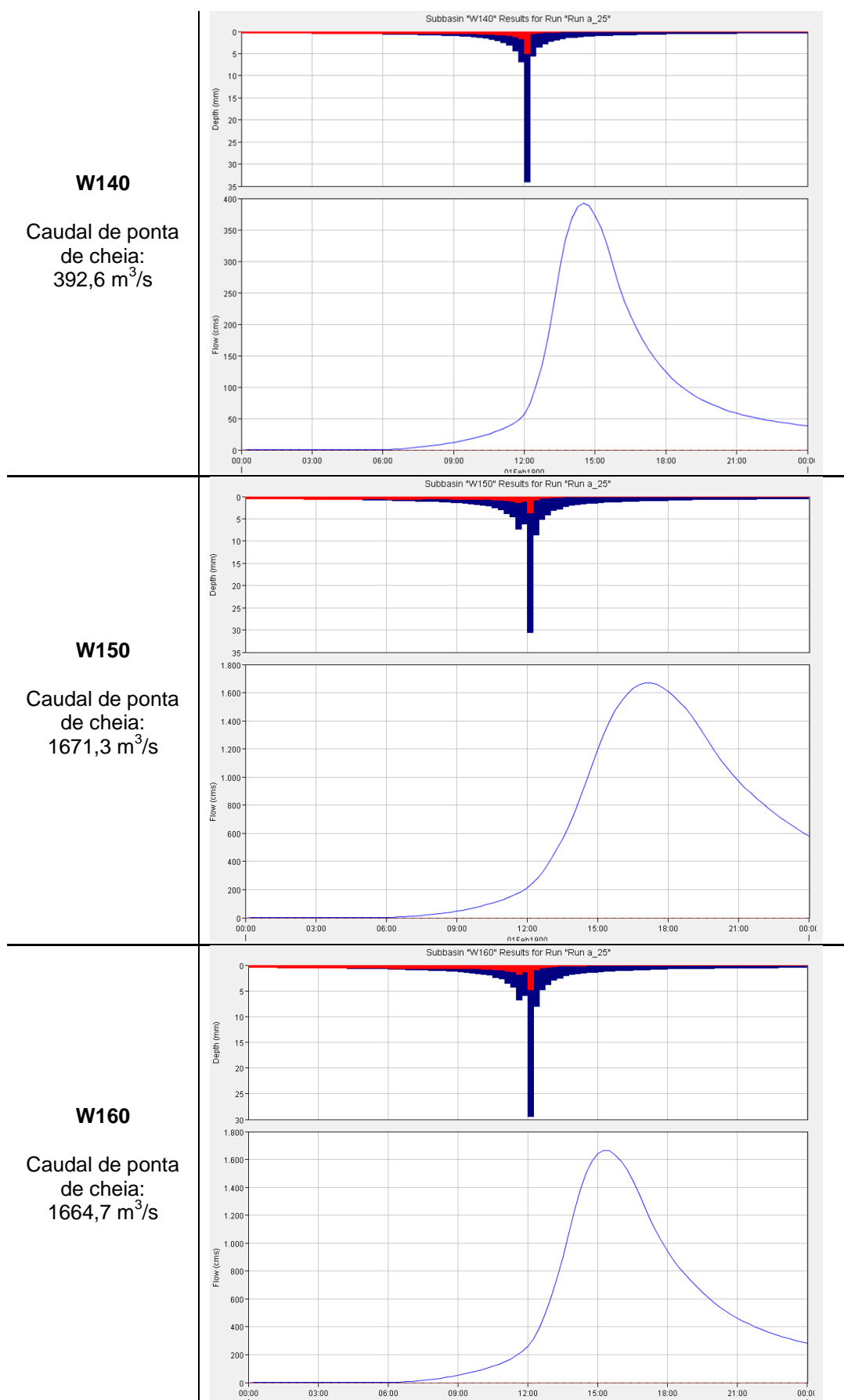
Curvas de possibilidade udométrica - Cubal



Curvas de possibilidade udométrica - Catengue



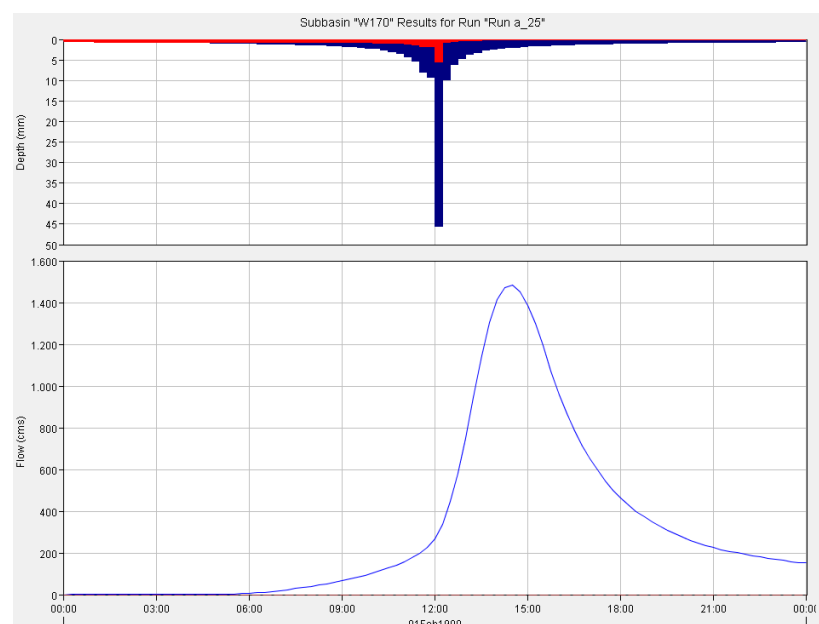
## Anexo II – Hietogramas e hidrogramas (sub-bacias)



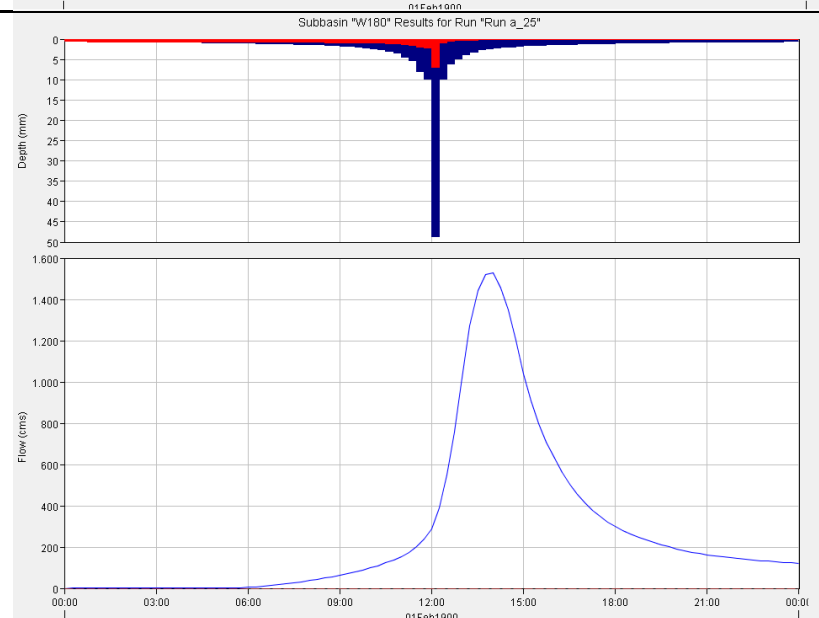


**W170**

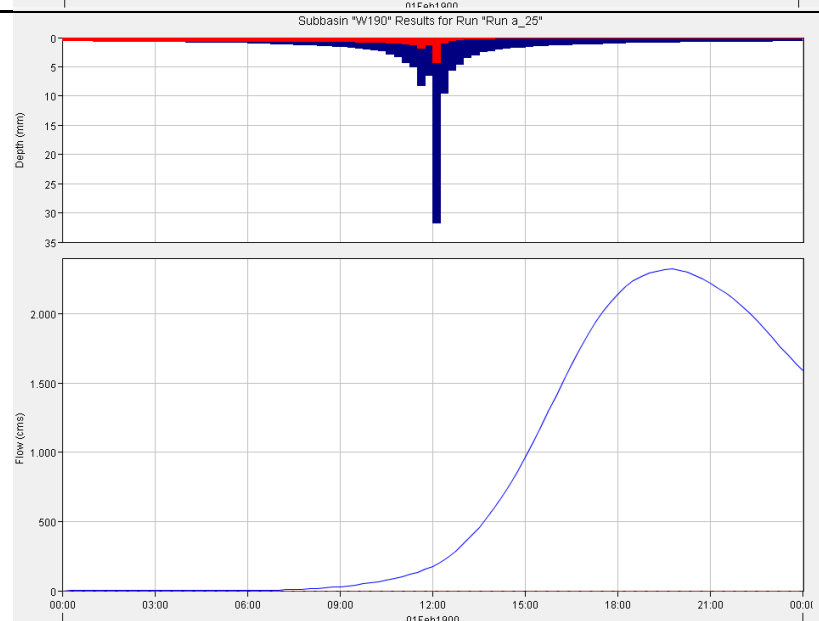
Caudal de ponta  
de cheia:  
1484,9 m<sup>3</sup>/s

**W180**

Caudal de ponta  
de cheia:  
1527,3 m<sup>3</sup>/s

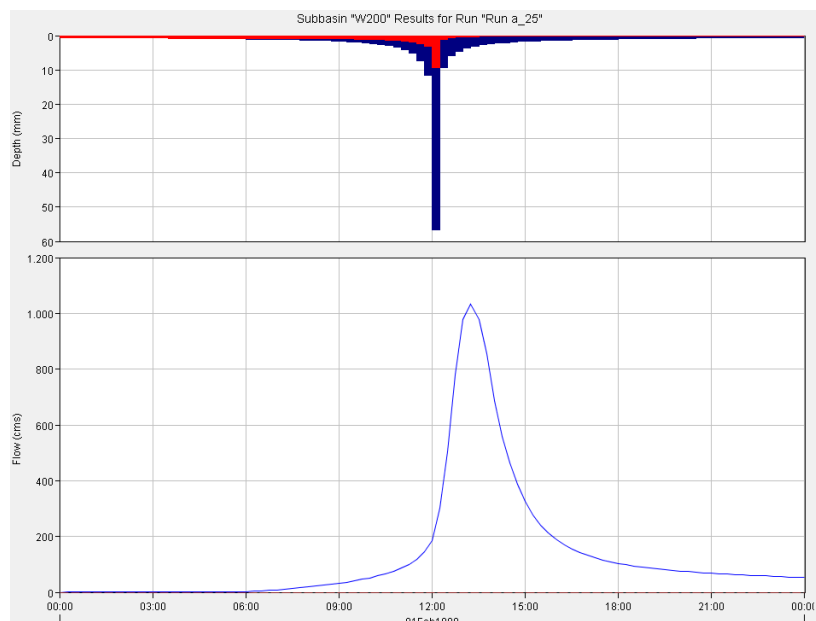
**W190**

Caudal de ponta  
de cheia:  
2321,9 m<sup>3</sup>/s

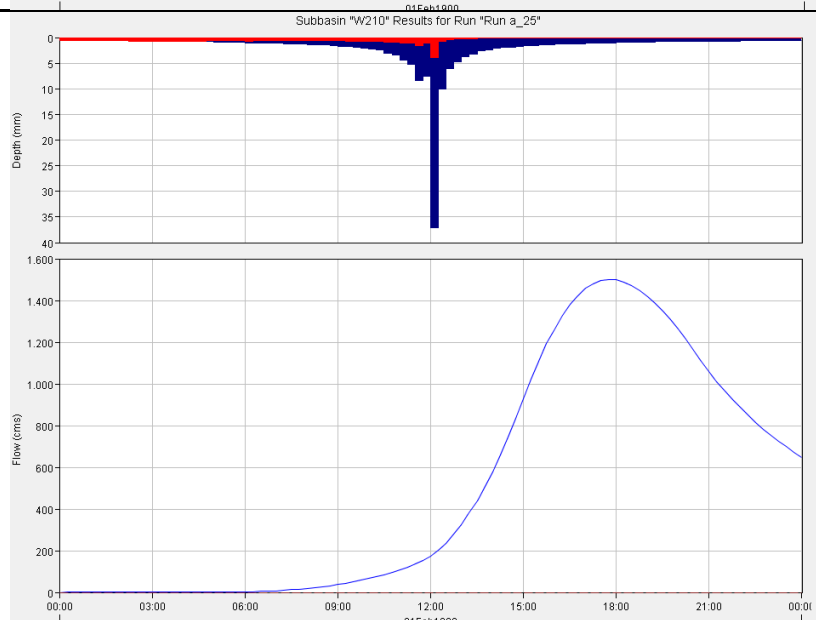


**W200**

Caudal de ponta  
de cheia:  
 $1033,8 \text{ m}^3/\text{s}$

**W210**

Caudal de ponta  
de cheia:  
 $1501,2 \text{ m}^3/\text{s}$

**W220**

Caudal de ponta  
de cheia:  
 $1610,6 \text{ m}^3/\text{s}$

